DISSERTATION

SUR LES DÉGRADATIONS

DU

PANTHÉON FRANÇOIS.

DISSERTATION

SUR

LES DÉGRADATIONS SURVENUES

AUX PILIERS DU DOME

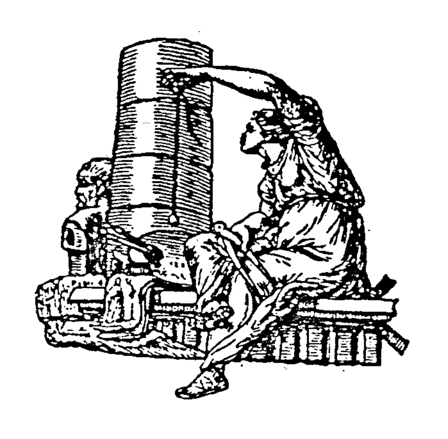
DU PANTHÉON FRANÇOIS,

ET

SUR LES MOYENS D'Y REMÉDIER.

PAR E. M. GAUTHEY,

ARCHITECTE ET INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES.



A PARIS,

DE L'IMPRIMERIE DE H. L. PERRONNEAU, IMPRIMEUR-LIBRAIRE, RUE DES GRANDS AUGUSTINS.

L'AN VI.

DISSERTATION
SUR
LES DÉGRADATIONS SURVENUES AUX PILIERS DU DOME DU PANTHÉON FRANÇOIS,
ET
SUR LES MOYENS D'Y REMÉDIER.

---

1. Les dégradations qui se sont manifestées depuis long-tems aux piliers du dôme du Panthéon françois, ayant paru devenir de jour en jour plus considérables, malgré les réparations que l'on y faisoit, ont excité la sollicitude du ministre de l'intérieur qui a consulté plusieurs artistes sur le parti qu'il convenoit de prendre pour procurer à cet édifice la solidité qui paroît lui manquer.

2. Cet objet a donné lieu à plusieurs discussions entre ces artistes qui, quoiqu'à peu-près de même avis sur les causes de ces dégradations, n'ont pas pensé de même sur les moyens d'y remédier.

3. Le citoyen Rondelet, avant la décision de cette affaire, a voulu en rendre juge le public, et a fait imprimer un mémoire où il rend compte d'une partie de ces discussions ; mais comme il n'étoit guère possible qu'il fît connoître bien exactement les raisons sur lesquelles les inspecteurs généraux des ponts et chaussées ont fondé leur avis, puisque son objet a été de les

Objet de l'Ouvrage.

combattre, j'ai cru ne pouvoir me dispenser d'exposer ces raisons avec quelques détails, afin que l'on puisse asseoir son jugement en plus grande connoissance de cause.

4. J'ai aussi fait connoître les autres projets qui ont été proposés par différens architectes, parce que de quelque côté que soit le meilleur parti à prendre, une pareille dissertation ne peut qu'être utile aux progrès de l'art, et peut sur-tout servir à éclairer les architectes dans la construction des grands édifices où l'on a pour objet de faire porter des masses considérables sur des points d'appui directs, ou sur des points d'appui indirects lorsque les premiers ne paroissent pas suffisans.

5. Je ne ferai pas la description de ce monument, parce qu'elle a été faite avec beaucoup de détails par le citoyen Rondelet; mais comme il paroît par le titre de son mémoire, que son intention étoit de donner l'historique de ce qui a donné lieu à sa construction, et qu'il ne l'a pas fait, j'ai cru devoir en parler, et rendre compte des motifs qu'a eu ou qu'a dû avoir l'architecte Soufflot dans la composition de ce projet et dans les changemens qu'il y a faits, ayant été dans le cas d'avoir, dès l'origine, plusieurs conférences avec lui sur cet objet; la connoissance des détails de la construction de cet édifice m'a paru nécessaire pour juger sainement des causes des dégradations qui existent et de leurs effets.

Division en 4 parties.

6. Cet ouvrage sera divisé en quatre parties;

La première comprendra l'historique de la construction de l'église de Sainte-Geneviève, à présent le Panthéon françois.

La seconde contiendra l'état actuel des dégradations de cet édifice, et leur cause.

La troisième, les discussions auxquelles ont donné lieu les différens moyens proposés pour arrêter ces dégradations et faire les réparations convenables.

La quatrième contiendra des recherches sur la poussée des voûtes sphériques.

Le citoyen Rondelet ayant fait un chapitre où il a prétendu prouver que ces voûtes n'avoient aucune poussée, j'ai pensé que cette proposition pourroit induire en erreur quelques architectes dans des édifices importans, et dont la ruine seroit infaillible si l'on ne donnoit pas aux piédroits des épaisseurs convenables; à cette occasion je ferai voir la cause des dégradations du dôme de Saint-Pierre de Rome, et je discuterai les moyens que l'on a employé pour y remédier. J'ai cru indispensable de traiter cet objet avec quelques détails, et comme depuis long-tems je m'étois occupé du calcul de l'épaisseur que doivent avoir les piédroits des voûtes, je donnerai à la fin de cet ouvrage des tables sur cet objet, parce que je n'ai pas encore eu l'occasion de les faire imprimer, et qu'elles serviront à rectifier celles qui ont été publiées dans le cours d'architecture de Blondel, que l'on suit ordinairement.

CHAPITRE PREMIER,

Détail historique sur l'édifice du Panthéon françois.

L'église de Sainte-Geneviève n'étoit pas suffisamment grande.

7. L'ÉGLISE de Sainte-Geneviève n'étoit pas à beaucoup près suffisante pour contenir l'affluence du peuple que sa dévotion à la patronne de Paris y attiroit communément : l'on portoit dans les calamités publiques la châsse de la sainte à Notre-Dame. Elle étoit alors accompagnée du clergé, des cours supérieures et des députés de tous les corps; le corps de ville avoit fait dans cette église plusieurs vœux, notamment en 1694, en 1710, en 1715. On descendoit la châsse pour obtenir la pluie ou le beau tems, et dans ces circonstances les deux tiers du peuple au moins restoient dehors. La nécessité d'avoir une plus grande église étoit évidente; la superficie de l'ancienne n'étant pas le cinquième de celle de Notre-Dame.

Un procureur des chanoines réguliers de Ste.-Geneviève entreprend de la faire rebâtir.

8. Un procureur des chanoines réguliers de Sainte-Geneviève, nommé Feru, homme entreprenant, imagina, vers l'an 1750, de faire réédifier cette église; il s'adressa à M. de Marigny, qui venoit d'être nommé sur-intendant des bâtimens, et n'oublia rien pour lui persuader d'intéresser le gouvernement à en faire la dépense.

9. M. de Marigny, charmé de saisir cette occasion pour illustrer son administration, engagea effectivement Louis XV à adopter l'idée d'ériger une église qui surpasseroit en beauté toutes celles de France, et qui même, si elle ne devoit pas approcher de l'étendue de l'église de Saint-Pierre de Rome, ou de Saint-Paul de Londres, devoit l'emporter sur ces deux fameux monumens (*)

(*) La superficie totale de l'emplacement occupé par l'église de Saint-Pierre de Rome, est de 5,600 toises. Celle de Saint-Paul, de 2,140; celle de Notre-Dame, de 1650.

par

par la beauté et la régularité de l'architecture; cet art ayant fait depuis le tems de la construction de ces deux édifices, des progrès qui promettoient de faire beaucoup mieux que ce que l'on avoit fait jusqu'alors.

10. On avoit déja fait en France un grand pas vers la perfection de l'architecture, par l'érection du portail de Saint-Sulpice dont la dépense avoit été effectuée sur les bénéfices d'une loterie; on pensa que l'on pouvoit employer le même moyen pour celle-ci. On augmenta de 4 sous les billets qui étoient de 20 sous; 2 sous de cette augmentation furent employés pour les dépenses de cette construction, et produisirent environ 400,000 livres par an.

11. Lorsque l'on fut déterminé à élever ce monument, on établit un concours pour choisir entre les différens projets qui seroient proposés; plusieurs artistes firent des dessins qui furent long-tems exposés à la bibliothèque des chanoines de Sainte-Geneviève, mais aucun ne parut remplir le but que l'on avoit en vue.

12. M. de Marigny qui avoit eu occasion de connoître les talens de Soufflot dans un voyage en Italie où cet artiste l'avoit accompagné, et peu content des dessins mis au concours, crut qu'il ne pouvoit mieux s'adresser qu'à un artiste dont le goût paroissoit formé sur de grands modèles, et qui en donnoit des preuves assez convaincantes. Il avoit déja acquis une grande pratique par les différens édifices qu'il avoit fait construire à Lyon, et il étoit alors occupé à faire élever le dôme de l'hôpital de cette ville.

Soufflot choisi pour en faire les projets.

13. Il lui écrivit de se rendre à Paris; lui expliqua l'intention du roi et la sienne, et le chargea de faire ce projet.

14. Soufflot avoit bien étudié l'architecture; ses deux voyages en Italie, et sur-tout le dernier qu'il avoit fait presqu'en qualité d'instituteur du sur-intendant des bâtimens, l'avoit obligé de raisonner souvent sur le goût et les principes de son art.

15. Il ne voyoit dans toutes nos églises modernes qu'une copie dégénérée de Saint-Pierre de Rome, édifice peut-être trop grand pour pouvoir être traité autrement, mais ne devant pas servir de modèle exclusif. De grandes arcades portées par de gros piliers forment de presque toutes nos églises un composé de plusieurs pièces détachées qui, quoique se communiquant toutes, semblent cependant être destinées à des objets différens plutôt qu'à former un ensemble où tout doit tendre au même but.

16. Les piliers, par leur grosseur, empêchant de voir tout l'ensemble, font paroître l'édifice plus petit qu'il n'est réellement. Ils offusquent d'autant plus qu'en se présentant souvent par la diagonale, cette diagonale est de plus d'un tiers plus grande que ne seroit le diamètre si les piliers étoient ronds.

17. Nos gros piliers et nos voûtes massives, si elles n'étoient pas très-élevées, ne présenteroient que de véritables catacombes.

18. Soufflot voyoit au contraire tous les temples antiques ornés de colonnades portant des platte-bandes; il connoissoit le bel effet que produit ce genre d'architecture; les temples de Pestum qu'il avoit le premier dessinés et mesurés, lui en avoient offert d'aussi beaux exemples que ce qu'il auroit pu voir en Grèce, quoique ayant peut-être été construits dans l'origine de l'architecture.

Il cherche à allier les péristiles avec les dômes.

19. Mais tous les exemples antiques donnent des entrecolonnemens étroits dont les modernes ne s'étoient pas encore beaucoup écarté lorsqu'ils avoient employé les colonnes. Les temples anciens étoient tous assez petits eu égard aux nôtres, et il étoit ici question de construire une grande église. Soufflot adopta la forme d'une croix, parce que cette forme est presque généralement consacrée pour les temples des chrétiens; mais il crut pouvoir réunir les beaux péristiles de l'antique avec ce que l'architecture moderne avoit ajouté de plus saillant et de plus étonnant dans la construction de nos temples, je veux parler des dômes qui sont de vastes tours élevées au centre de l'édifice au-dessus des

voûtes des quatre nefs ; elles ne portent que sur le milieu des extrémités de ces voûtes, et du reste sont portées en encorbellement par les piliers au moyen des panaches qui réunissent la base du dôme, les ceintres des voûtes des nefs et la largeur des piliers.

La position extraordinaire d'un pareil édifice dont la base est placée à une très-grande hauteur au-dessus du sol, avoit engagé presque tous les architectes qui en avoient élevé avant lui, à construire des piliers d'un très-gros volume pour les porter. Le dôme de Saint-Pierre de Rome qui est le plus grand qui existe et le plus élevé, est porté sur des piliers dont la largeur est égale au demi-diamètre du dôme ; les piliers du dôme de Saint-Paul de Londres ont à-peu-près la même étendue relative ; ceux du Val-de-Grâce sont beaucoup plus grands ; la plupart des autres dômes qui ont aussi des piliers fort gros, sont encore contre-buttés par des massifs considérables et même par des voûtes qui donnent à ces dômes de très-grandes bases.

21. Mais tous ces exemples ne pouvoient nullement s'accorder avec les péristiles adoptés par Soufflot. Cet architecte vouloit en même tems que ces massifs ne divisassent pas, comme dans toutes nos églises, l'édifice en quatre parties qui n'ont presque rien de commun les unes avec les autres que leur centre de réunion sous le dôme.

22. Pour accorder deux choses qui paroissent presqu'incompatibles, il imagina d'abord de ne former qu'une coupole peu élevée au lieu d'un dôme, au moyen de quoi il n'avoit pas besoin d'avoir de piliers fort étendus ; il formoit cependant au-dehors la tour du dôme, mais cette tour étoit peu considérable et ne chargeoit pas beaucoup les piliers.

23. Son plan général étoit une croix grecque, c'est-à-dire, qu'il formoit quatre nefs égales entourées de péristiles ; il avoit formé son entrecolonnement beaucoup plus grand qu'on ne le fait ordinairement, par là il donnoit une certaine étendue aux piliers Idée du plan de cet édifice.

qui doivent porter le dôme, et n'empêchoit pas d'appercevoir presque en entier les nefs collatérales entre ces colonnes et les murs du pourtour, il faisoit voir de chaque point des axes, l'étendue de presque tout l'édifice, ce qui n'existoit dans aucune église où l'on avoit construit des dômes.

24. Il formoit un péristile au-dehors dans le genre de celui du Panthéon de Rome, avec un seul ordre d'architecture et un grand fronton, ce qui différoit de nos églises où l'on avoit presque toujours employé deux ordres l'un au-dessus de l'autre; mais ce qui le distingue plus particulièrement de celui du Panthéon, c'est que le fronton est appuyé sur des colonnes couplées formant arrière-corps, et que dans le milieu il y a une grande voûte portée sur huit colonnes, dont la poussée est retenue par les colonnes des extrémités au nombre de six de chaque côté : le porche du Panthéon de Rome n'est point voûté, on voit même la charpente du comble.

Les voûtes en cul de four sont substituées aux voûtes en berceau.

25. Les voûtes en berceau paroissent lourdes lorsqu'elles sont portées par des colonnes; Soufflot imagina de former au milieu de chaque nef une voûte en cul de four portée par quatre panaches liés avec quatre berceaux de la largeur d'un entrecolonnement. Cette disposition donne beaucoup d'étendue aux nefs, indépendamment des péristiles qui les environnent. Les voûtes ne sont portées que par quatre colonnes en avant des péristiles, et au moyen des lunettes pratiquées dans les voûtes en berceaux qu'il a imaginées depuis son premier projet, elles ont toute la légéreté des voûtes gothiques, ce qui étoit nécessaire pour ne pas faire paroître ces colonnes trop chargées.

Ce plan réunit tous les suffrages.

26. Lorsque ce plan parut, il réunit tous les suffrages des amateurs des arts; sa simplicité étonna les artistes : on trouva que son auteur avoit appliqué avec beaucoup d'adresse la décoration des temples antiques à la forme de nos églises, et qu'il avoit sur-tout évité la disparité des masses lourdes des piliers ordi-

naires des dômes, avec la légéreté des colonnes, en ne faisant qu'un ensemble de tout l'édifice.

27. Ce plan fut gravé en 1757 par Bellicard; le module des colonnes de l'intérieur étoit de 4 pieds, et celui de l'extérieur, de 6 pieds. L'entrecolonnement de part et d'autre étoit de trois diamètres. L'église avoit 113 pieds de largeur entre les murs, sur 277 pieds de longueur. La surface totale étoit de $\frac{1}{7}$ plus grande que celle de Saint-Sulpice, presque le double de celle de Saint-Roch, et seulement de $\frac{1}{11}$ moindre que celle de Notre-Dame. Mais la surface de l'intérieur de l'église et du porche, déduction faite des piliers et colonnes, étoit de 52,950 pieds, ce qui est un peu plus que celle de Notre-Dame qui n'a que 52,790 pieds. On dit que ce fut cette considération seule qui engagea Soufflot à diminuer l'étendue de son édifice, croyant que la métropole devoit dominer sur toutes les autres églises, mais il y a plus d'apparence que les carrières que l'on découvrit du côté du midi de l'emplacement, en faisant des sondes, furent la principale cause qui lui fit restreindre l'étendue qu'il avoit d'abord projetée de lui donner. Il changea le module de l'ordre; au lieu de 4 pieds, il ne donna que 3 pieds ½ de diamètre aux colonnes, ce qui diminuoit la surface de plus d'un quart, en la réduisant à 40,540 pieds.

Comparaison de son étendue avec celle de quelques églises.

28. Ce fut peut-être encore plus une raison d'économie du e ms et de la dépense, qui le détermina à faire ce changement, que toute autre chose, car on pouvoit aisément soutenir les carrières par des massifs de maçonnerie, mais lorsque le plan de l'église fut tracé suivant ces mesures, on trouva son étendue trop petite, et on engagea ou plutôt on força l'architecte à augmenter la longueur de la nef d'entrée, de 28 pieds, et celle du côté du chœur, de 37 pieds, sans cependant rien changer aux nefs collatérales.

Changement dans le plan.

29. Il est certain que ce changement a fait quelque tort à ce plan. Les deux parties allongées sont d'un autre genre d'architecture, puisqu'on y a employé des piliers et des arcades qui forment une disparité assez choquante avec les autres parties, et

ôtent la belle uniformité et la parfaite régularité qui régnoit dans le premier plan : la surface actuelle est de 42,730 pieds.

La surface du plan des piliers parut trop petite.

30. Lorsque l'église fut élevée au niveau du sol, et que l'on compara la surface du plan des piliers qui devoient soutenir le dôme, avec ceux des autres dômes construits jusqu'alors, on fut étonné de leur peu d'étendue relative. M. Patte s'éleva sur-tout fortement contre cette nouveauté; il publia un ouvrage dans lequel il voulut prouver que ces piliers ne seroient pas suffisans pour porter un dôme, et il crut le faire en donnant en parallèle les dessins des dômes de Saint-Pierre de Rome, de Saint-Paul de Londres, des Invalides, du Val-de-Grâce et de la Sorbonne avec celui de Sainte-Geneviève; mais pour qu'il eût pu donner par là quelque probabilité à son assertion, il auroit fallu qu'il eût démontré que les piliers des dômes qu'il citoit, n'eussent eu que les dimensions exactes qu'ils devoient avoir pour soutenir le poids; car s'ils sont beaucoup plus considérables qu'il ne faut, ces exemples ne pouvoient servir à son objet; d'ailleurs toutes les églises où l'on avoit élevé des dômes, étoient construites avec de gros piliers qui portent des voûtes, tandis qu'ici on employoit des colonnes et des plattes-bandes; il falloit donc ou renoncer à élever un dôme, ou n'avoir pas des piliers aussi considérables que ceux que l'on avoit construit jusqu'alors.

On ne pouvoit pas comparer ce dôme aux autres.

31. Il étoit visible d'ailleurs, que presque aucun des dômes proposés en parallèle avec celui de Sainte-Geneviève, ne pouvoit lui être comparé, parce que tous les piliers de ces dômes ou font partie des murs de l'église, tels que ceux de Saint-Paul de Londres, du Val-de-Grace et de la Sorbonne, ou sont contrebuttés par des voûtes qui s'appuient sur ces murs, tels que ceux de Saint Pierre de Rome, des Invalides, etc., au lieu que le dôme du Panthéon ne tient aux murs de long-pan, que par un-arc boutant très élevé qui ne porte qu'une petite partie du poids, et ne sert presque pas à le consolider.

32. J'ai fait la comparaison des piliers du dôme du Panthéon françois avec ceux de Saint-Pierre de Rome et de Saint-Paul de Londres, qui sont beaucoup plus considérables que lui, et avec deux autres dômes qui sont plus petits : l'un est celui de Saint-Augustin de Plaisance, l'autre est celui d'une petite église que j'ai fait construire à Givry en Bourgogne ; mais j'observerai par rapport à cette dernière église (fig. 17) dont la coupole a 36 pieds de diamètre, et qui ne paroît portée que par huit colonnes de 2 pieds 9 pouces de diamètre qui ne produisent que 34 pieds de surface, qu'il y a en outre huit arcs-boutant A. sous les toits qui ont 40 pieds de surface et qui s'appuient sur de fort gros massifs.

33. L'on doit observer que ce n'est pas en comparant ces dômes par la surface de leurs piliers relativement à leur diamètre, que l'on pourra juger de ceux dont les supports sont plus ou moins chargés ; la seule manière de faire cette comparaison est de chercher pour chacun d'eux quel est le poids que porte chaque pied quarré, et l'on verra par le tableau ci-après, qu'à Saint-Pierre ce poids est de

	Saint-Pierre de Rome.	Saint-Paul de Londres.	Panthéon françois.	Coupole de Givry.	St.-Augustin de Plaisance.
Diamètre intérieur........	127 p...	102 p...	619p...	36 ½ p...	29 p...
Surface des piliers.........	11,152....	2,580....	548....	74....	88.....
Cube de la charge sur les piliers.	244,465....	93,072...	26,680....	2,131....	2,900.....
Charge par pied quarré.......	21,910 liv..	36,059 liv..	48,687 liv..	28,740 liv..	32,958 liv..

Comparaison du poids que portent les piliers de différens dômes.

22 milliers, à Saint-Paul de 36, au Panthéon de 48, à Givry de 28 ¾, et à Saint-Augustin de 33 miliers. Mais si à Givry on ne comptoit que les colonnes qui paroissent porter la coupole, le

pied cube porteroit plus que par-tout ailleurs. La charge seroit de 63 milliers sur chacun d'eux.

34. Il résulte de cette comparaison, que les piliers du Panthéon sont effectivement plus chargés que les autres, mais non pas dans une disproportion aussi grande qu'on pourroit le penser en ne considérant que les surfaces comparées aux diamètres, puisque chaque pied quarré des piliers du Panthéon ne porte pas beaucoup plus du double de ceux des piliers de Saint-Pierre de Rome, qui est celui de tous les dômes qui charge le moins les piliers; mais on voit par-tout ces exemples, que la charge est très-différente pour chacun d'eux, puisqu'elle varie de plus du double, ce qui fait voir que dans la construction de tous ces dômes on n'a suivi aucune règle résultante de la charge que peuvent porter les pierres.

35. M. Patte s'étoit sur-tout attaché à prouver que les murs du dôme de Sainte-Geneviève ne pouvoient pas avoir une assez grande épaisseur pour que la poussée des voûtes ne les renversât pas ; il observa que la partie des deux arcs-doubleaux qui, suivant lui, devoit porter ce dôme, ne pouvoit avoir que 3 pieds 9 pouces d'épaisseur; il en inféroit que le mur de la tour du dôme ne pouvoit en avoir davantage, et que cette épaisseur étoit bien loin d'être suffisante pour soutenir la poussée de deux voûtes de 68 pieds de diamètre. Il vouloit que cette épaisseur fût de 9 pieds. Cependant par le calcul géométrique, il ne trouvoit que 4 pieds $\frac{1}{2}$.

Mémoire en réponse aux objections de M. Patte.

36. Je crus dans le tems pouvoir répondre à toutes les objections de M. Patte, et je fis imprimer en 1791, un mémoire où je démontrai que les arcs-doubleaux étoient suffisans pour donner aux murs de la coupole au moins 5 pieds $\frac{1}{2}$ d'épaisseur, et qu'en leur donnant seulement 4 pieds, ils offriroient encore une résistance de moitié au-dessus de la poussée.

37. Je

37. Je fis voir que tous les exemples cités par M. Patte, ne pouvoient former aucune autorité, puisque lorsqu'on avoit exécuté tous ces édifices, l'on n'avoit encore aucune règle démontrée pour calculer la poussée des voûtes; que cette matière n'avoit été traitée qu'au commencement de ce siècle, par M. de la Hire, et qu'il n'étoit nullement prouvé que les épaisseurs employées jusqu'à présent eussent été nécessaires; que quand même il eût été indispensable de donner au dôme de Sainte-Geneviève l'épaisseur de 9 pieds, on auroit encore pu le faire en déchargeant le milieu des arcs par une grande lunette vis-à-vis ce milieu, pour reporter la charge sur les reins des arcs-doubleaux, où la largeur des arcs-doubleaux augmentée de la saillie des panaches, donnoit beaucoup plus que cette épaisseur, et que l'on avoit même projeté de construire quatre avant-corps ou contre-forts au-dessus des piliers, au moyen de quoi la charge seroit reportée sur le massif des piliers même; enfin que si ces piliers n'étoient pas suffisans par eux-mêmes pour porter la charge d'un dôme considérable, on pourroit reporter cette charge sur les murs de l'édifice, par des arcs-boutans dont la poussée se feroit suivant la direction de leur longueur, ce qui donneroit des contre-forts immenses qu'aucune force résultante des constructions ne pourroit renverser.

38. Le citoyen Bossut donna aussi, dans les mémoires de l'académie, en 1774 un mémoire sur la poussée des voûtes des dômes, et en appliquant sa théorie au dôme de Sainte-Geneviève, il trouva que l'épaisseur des piédroits devoit être de 4 pieds 11 pouces, Soufflot l'avoit réglée à 5 pieds 8 pouces, le citoyen Bossut démontra aussi que cette épaisseur seroit encore suffisante quand même on augmenteroit d'un quart l'épaisseur des voûtes du dôme.

Mémoire du cit. Bossut.

39. La seule objection fondée que l'on auroit pu faire en comparant les piliers du dôme du Panthéon avec ceux des autres dômes, c'est que l'on pouvoit penser qu'ils pourroient être écrasés par la charge du dôme; mais je crus alors que cette crainte de-

L'objet principal devoit être de savoir si les piliers ne pouvoient pas s'écraser.

voit être dissipée en se rappelant toutes les précautions que l'on avoit prises dans la construction de cet édifice à qui M. Patte même avoit donné de grands éloges. Tous les constructeurs savent, disois-je, que la résistance qu'opposent les pierres à la puissance qui tend à les écraser, est immense lorsque toutes leurs parties sont appuyées exactement les unes sur les autres.

40. Mais comme nous n'avions à cet égard aucunes expériences qui démontrassent sensiblement quelle étoit réellement cette force, et que je pensois que c'étoit par là seulement qu'il pouvoit y avoir quelque défaut dans les piliers en question, je me déterminai à faire sur cet objet des expériences assez en grand, et assez multipliées pour pouvoir en déduire le poids que peuvent porter les pierres de différentes natures que l'on emploie dans les édifices; en conséquence je fis faire une machine au moyen de laquelle je pouvois mettre une charge considérable sur des parallélipipèdes de pierre jusqu'à ce qu'ils fussent écrasés, et après une quantité d'expériences répétées avec le plus grand soin, il me fut aisé de conclure, 1°. que la résistance de la pierre étoit proportionnée à la surface portante, en observant pourtant que les arrêtes s'éclatoient fort aisément, 2°. que le pied quarré de pierre à-peu-près pareille à celle dont étoient construits les piliers, pouvoit porter au moins 600 milliers. Je fis imprimer le détail de ces expériences dans le journal de physique du mois de novembre 1774.

Expériences faites pour en juger.

41. Je fis voir à M. Soufflot, dans un voyage qu'il faisoit pour aller à Lyon, différentes expériences avec cette machine, j'en fis aussi part à M. Perronet, l'un et l'autre firent faire de pareilles machines, et ont fait aussi un grand nombre d'expériences qui toutes n'ont servi qu'à confirmer celles que j'avois faites. Ces mêmes expériences furent encore répétées en présence de l'académie d'architecture. Contant, architecte de la Magdelaine, en fit de pareilles, d'où M. Soufflot et lui conclurent qu'ils n'avoient rien à craindre de la charge qu'ils devoient faire porter

aux colonnes et piliers qu'ils employoient. Quoique le projet de Contant ne fût pas d'élever un dôme complet à l'église de la Magdelaine, il devoit cependant faire porter une très-grande charge à quatre groupes de trois colonnes isolées qu'il plaçoit dans la croisée, et cette charge à proportion de la surface du plan des colonnes, comparée avec celle des piliers du dôme de Sainte-Geneviève, devoit être beaucoup plus grande qu'à ceux-ci. Cet architecte avoit bien senti l'inconvénient des gros piliers dans une église, aussi avoit-il pris le parti de les supprimer tout-à-fait et de n'employer que des colonnes; il se proposoit sans doute de reporter sur les murs du pourtour la plus grande partie du poids de la calotte ou de la coupole qu'il auroit élevée; il avoit construit dans les angles rentrans, des massifs qui auroient sans doute servi pour cet effet.

42. Les expériences que l'on a faites pour connoître la charge des pierres, n'ayant pu se faire que sur des pierres de petites dimensions, qui ont beaucoup de pourtour eu égard à leur superficie, et ce pourtour s'éclatant aisément, il est bien certain que si les expériences pouvoient être faites sur de gros blocs tels que ceux que l'on emploie dans les bâtimens, ils porteroient beaucoup davantage, par conséquent que l'on ne risque rien de compter sur ces expériences pour se guider dans la charge que l'on veut faire porter aux points d'appui.

43. Soufflot éprouva sous la machine à écraser les pierres, que celle qu'il employoit pour les piliers, pouvoit porter plus d'un million de livres par pied cube, sans s'écraser, et comme les piliers avoient plus de 500 pieds de superficie, il pouvoit conclure qu'ils pourroient porter plus de 500 millions, ce qui étoit plus de vingt fois plus considérable que le dôme qu'il avoit projeté pour lors.

Mais ce raisonnement supposoit que les surfaces du lit de toutes les pierres des piliers portoient immédiatement les unes sur les autres, tandis que par le genre de construction qu'il avoit adopté,

il n'y a qu'une très-petite partie de ces lits qui portent complettement.

Motifs de Soufflot pour augmenter le dôme.

44. Soufflot n'avoit d'abord eu le projet que de former une coupole peu élevée dans l'intérieur; il ne faisoit qu'une voûte presque sphérique élevée sur un stilobate qui n'avoit pas pour hauteur le cinquième du diamètre de la voûte. Cette voûte n'étoit éclairée que par des œils de bœuf; il formoit cependant au-dehors un tambour de dôme qui supportoit une seconde voûte; mais en comparant cette partie de l'édifice avec le portail qui devoit être d'une grande architecture, et composé de colonnes de près de 60 pieds de hauteur, elle paroissoit très-petite et nullement d'accord avec lui, puisque les colonnes du tambour n'avoient pas la moitié de la hauteur de celles du portail, et par conséquent qu'elles n'en étoient pas la huitième partie; la masse même du dôme contrastoit singulièrement avec celle du portail. Soufflot qui voulut corriger ce défaut, croyant qu'il lui seroit difficile d'augmenter cette masse, imagina d'abord de donner à ce couronnement un caractère lourd; il le terminoit par une pyramide qui étoit analogue au tombeau de la Sainte dont la châsse devoit être effectivement au-dessous; et lors de la pose de la première pierre, une médaille fut frappée où ce projet étoit exprimé.

45. Mais il s'en falloit bien qu'il ne corrigeât par là le défaut d'accord du portail et du dôme; les expériences faites sur la charge que peuvent porter les pierres, en rassurant l'architecte, lui firent ensuite imaginer d'augmenter considérablement son dôme, et de faire servir les murs même des nefs à porter une colonnade qui, en donnant plus de diamètre à ce monument, le mit plus d'accord avec le portail.

Conseils de reporter la charge du dôme sur toutes les parties de l'édifice.

46. J'avois dit dans mon mémoire que si l'on prenoit le parti, par le moyen des arcs-boutans et des décharges multipliées, de faire porter le poids à plomb sur le milieu des colonnes, et principalement sur les murs du pourtour, il seroit possible de supprimer les piliers en ne laissant que les colonnes qui y sont en-

gagées, et que l'on pouvoit donner au dôme 80 pieds de diamètre au lieu de 61 pieds 9 pouces; Soufflot trouva cette assertion un peu forte; pour la lui prouver, je cherchai à faire un projet d'un dôme (fig. 14, 15 et 16) qui comprenoit à l'extérieur toute la largeur des nefs de l'église Sainte-Geneviève, et portant entièrement sur les murs et sur des massifs *a a* construits dans les angles extérieurs par le moyen de grandes arches *j g h g* en plein ceintres qui prenoient leur naissance au-dessus des colonnes, et qui avoient pour culées les murs même de l'édifice. Ces arches devoient être liées ensemble dans l'intérieur, par de grands panaches g e G qui devoient servir à porter ce dôme, et ces panaches étoient eux-mêmes contre-butés par des arcs-boutans C C inclinés suivant la pente du toit qui devoit les cacher. Je formois aussi au-dessous de ces panaches de gros arcs-boutans D E F G qui portoient le dessus des panaches intérieurs; on auroit élevé sur ces massifs construits dans les angles, quatre tours *a* qui auroient accompagné le dôme, et dont deux auroient servi de clochers; par cette construction les piliers H J L ne portoient rien du tout, et étoient évidés, ainsi que les panaches qui étoient percés d'un grand ovale *d* où l'on établissoit une tribune.

Projet d'un dôme proposé à Soufflot.

47. Cette disposition de force dont la base étoit consolidée par les massifs construits contre les pans coupés extérieurs, donnoit lieu de former deux colonnades l'une g C au-dehors, l'autre f F au-dedans, qui auroient été portées par les panaches intérieurs et extérieurs, et en continuant la voûte des grands panaches P Q jusque contre le stilobate intérieur, on formoit une partie de voûte R Q sphérique dont toutes les assises faisant clef, étoient susceptibles de porter un mur aussi épais qu'il étoit nécessaire pour soutenir la poussée des deux voûtes du dôme, l'une pour l'extérieur et l'autre pour l'intérieur. La colonnade intérieure M formoit un large péristile avec plusieurs rangs de gradins indépendamment du passage, ce qui donnoit lieu d'établir au-dessus de la corniche un amphithéâtre S qui, ainsi que le péristile, pou-

voit contenir une grande quantité de peuple pour voir aisément les cérémonies qui avoient lieu lors des prières publiques.

48. Le péristile extérieur K étoit beaucoup plus étroit que celui de l'intérieur M, et je pratiquois quatre avant-corps *j h* formés chacun de quatre colonnes pour soutenir une partie de la poussée des voûtes qui, par ce moyen, avoient de larges empâtemens. Ces avant-corps n'empêchoient nullement la communication des quatre péristiles auxquels ils servoient d'appui; et j'y avois pratiqué les escaliers pour monter à l'amphithéâtre et sur les voûtes qui étoient toutes deux percées d'une large ouverture à leur sommet par où elles recevoient le jour. La voûte extérieure étoit couronnée d'une colonnade V à jour, mais fermée de vitres entre les colonnes. Cette voûte formoit un empâtement suffisant sur les colonnes extérieures, à-peu-près dans la proportion de celui du dôme des Invalides.

49. Je montrai l'esquisse de ce projet à Soufflot qui le trouva beaucoup trop considérable, et qui étoit d'ailleurs attaché aux fenêtres qu'il auroit fallu supprimer en partie, sur-tout celle des pans coupés, ainsi que le passage *f* qu'il y avoit pratiqué; cependant il me dit qu'il avoit bien intention d'augmenter son dôme depuis qu'il s'étoit assuré de la charge que les pierres pouvoient porter.

Colonnade extérieure octogone, et ensuite circulaire.

50. Il imagina d'abord de faire une colonnade octogone, parce qu'elle portoit directement sur des grands arcs qu'il avoit projeté dans l'alignement des murs, et bientôt il se détermina à faire comme au dôme de Saint-Paul de Londres, une colonnade ronde et uniforme; mais comme les arcs qui portent cette colonnade sont très-éloignés de ceux qui portent la tour intérieure, il en est résulté, 1°. que la coupole n'a pas eu plus de diamètre que celle qu'il avoit d'abord projetée; 2°. que l'empâtement que forme la colonnade est trop grand et le dôme encore trop petit comparé avec le portail, parce que l'on n'a pas osé faire porter le mur du tambour sur le cerveau d'une voûte, cette voûte n'ayant pas

été faite en continuation des grands panaches, comme on pouvoit le faire.

51. L'église de Sainte-Geneviève fut fondée en 1757 et 58 ; en 1764 elle étoit élevée au niveau du sol, à cette époque l'on posa la première pierre au-dessus des fondations ; l'entablement fut posé sur les piliers en 1768, les murs du pourtour furent élevés à leur hauteur en 1774. En 1776 on éleva les arcs-doubleaux et les pendentifs, à leur déceintrement il se manifesta quelques éclats dans les pierres du parement des piliers ; en 1778 on construisit les quatre grands arcs pour porter la colonnade extérieure, au déceintrement il se manifesta encore quelques éclats.

Epoques des diverses constructions.

En 1781 M. Patte dénonça plus de quatre-vingt pierres fendues qu'il avoit remarquées au bas de ces piliers sur 9 pieds de hauteur, et un plus grand nombre en portant plus haut ses regards ; on avoit déja employé pendant plus d'un an plusieurs ouvriers à chaque pilier pour ouvrir les joints des assises trop serrées sur le devant. Les ouvrages furent interrompus après la mort de Soufflot depuis 1782 jusqu'en 1786. On en étoit alors au-dessus de la platte-forme sur laquelle est porté ce dôme. En 1786 on l'éleva jusqu'au-dessus des architraves de l'ordre extérieur, en 1788 l'on parvint à la naissance de la voûte extérieure qui fut faite en 1789, et la lanterne en 1790.

En 1789 on commença les incrustemens des pierres éclatées ; on les continua en 1791 et 92 ; en 1793 et 94 on ôta les échafauds et l'on ne fit point d'incrustemens.

52. Le 15 août 1791, le citoyen Quatremere-Quincy fut chargé de la direction des travaux du Panthéon, lorsque la destination de cet édifice fut changée, et que d'une église chrétienne on en fit un monument destiné à recevoir les restes des grands hommes qui avoient bien mérité de la patrie.

Changement de destination de l'église de Ste.-Geneviève.

On chercha, autant qu'on le put, à faire quelques change-

mens qui marquâssent la destination nouvelle et éloignassent l'idée de l'ancienne.

53. On commença par supprimer les fenêtres du pourtour, pour ne laisser que les jours des voûtes; l'édifice resta suffisamment éclairé, et il offre plus de recueillement. Les tours ou clochers ne faisoient pas un bel effet, et devenoient absolument inutiles; elles furent supprimées; la lanterne le fut aussi, mais on auroit peut-être pu attendre pour faire cette dernière suppression, que la statue qui devoit la remplacer fût exécutée; l'on supprima encore les portes collatérales du porche, et l'on jeta bas des tables saillantes, des guirlandes et autres ornemens; les murs restèrent lisses, et firent mieux valoir la richesse des colonnes cannelées. On supprima les bas-reliefs tant de l'intérieur que de l'exterieur; l'on en substitua d'autres analogues à la nouvelle destination de l'édifice. On orna les entrecolonnemens du fond du péristile, de figures colossales; on supprima à l'intérieur quelques ornemens dans les voûtes qui en ont encore assez. Les grands cadres des panaches furent aussi enlevés, ainsi que des bossages dans les trois faces des piliers destinés à former des médaillons.

Les suppressions causèrent un ébranlement général, et de nouveaux tassemens.

54. Mais ces suppressions, ainsi que le ragréement général de toutes les faces apparentes du dôme, ayant exigé un travail de plus de deux cents ouvriers qui frappoient à-la-fois dans toutes les parties de l'édifice, ils y causèrent un ébranlement général, et l'on s'apperçut alors que les fentes se multiplioient dans les piliers et sur-tout dans les colonnes, que plusieurs pierres s'éclatoient sur le devant, et qu'il s'en détachoit des morceaux. On reprit alors les incrustemens dans les piliers, en remplaçant toutes les pierres éclatées et même celles qui n'étoient que fendues. Ces remplacemens se sont faits sur 5 à 7 pouces de profondeur, quelquefois jusqu'à 9 et 10 pouces; il y a même eu quelques pierres qui ont été remplacées en entier, lorsqu'elles n'avoient pas beaucoup de lit.

55. Il n'est pas douteux que ces incrustemens, en ébranlant les piliers, n'aient occasionné de nouveaux tassemens; d'ailleurs les pierres remplacées n'ayant pas plus de parties portantes que celles que l'on ôtoit, on ne pouvoit nullement par là diminuer le tassement, et les colonnes que l'on ne réparoit pas, supportant alors une plus grande charge qu'auparavant, puisque les piliers tassoient sans que les colonnes tassassent autant que lui, il en est résulté qu'elles se sont éclatées, et que quelques-unes de leurs parties ont bouclé assez considérablement.

56. Ce fut alors que le citoyen Gondoin, qui crut que ces dégradations étoient très-inquiétantes, en avertit le ministre, et chercha à lui persuader qu'il y avoit un danger imminent que cet édifice ne s'écroulât totalement. Avertissement du citoyen Gondoin.

Le ministre chargea, le 8 ventôse an 4, les citoyens Chalgrin, Brongniard, Rondelet et Gondoin, de faire une visite de ce monument, et de lui rendre compte du résultat de cet examen.

57. Ces architectes s'acquittèrent de leur commission et dirent, qu'ils avoient reconnu que les paremens des piliers s'écrasoient, se lésardoient et tomboient, en entraînant dans leur chûte des morceaux de 7 à 8 pouces d'épaisseur; qu'il y avoit un danger imminent de laisser cet édifice sans une réparation majeure et prompte. Visite et rapport de quatre architectes.

Ils proposèrent de commencer par étayer les quatre grands arcs-doubleaux qui portent une partie du dôme, et donnèrent ensuite un projet pour augmenter la surface des piliers en remplissant l'intervalle qu'on a laissé entre les colonnes qui y sont engagées, et remplaçant même ces colonnes par des corps lisses.

58. En conséquence de cet avis, le ministre donna ordre de faire conduire les bois de l'église de la Magdelaine au Panthéon pour faire ces étaiemens. Ordre du ministre d'étayer le dôme.

Le cit. Soufflot, neveu, qui pensoit que ces étaiemens n'étoient nullement nécessaires, et qu'en continuant les incrustemens on viendroit à bout de tout réparer, demanda au ministre de vou-

loir bien consulter encore d'autres artistes que ceux qui lui avoient fait ce rapport, parce qu'il étoit probable qu'ils s'étoient trompés dans l'avis qu'ils lui avoient donnés, et le citoyen Poncet, entrepreneur de l'édifice, lui observa qu'il n'étoit pas question ici de décider des règles de la décoration d'édifices, ni même de construction d'édifices ordinaires; que les piliers du Panthéon n'étoient que des piédroits de grandes voûtes extrêmement chargées, et que les ingénieurs des ponts et chaussées, suivant lui, étoient les véritables artistes en état de décider par la pratique qu'ils ont dans la construction des grands ponts, si les accidens arrivés aux colonnes et massifs sont assez importans pour obliger de prendre les précautions extraordinaires que l'on conseilloit, et s'il ne suffisoit pas de continuer les réparations comme on les avoit commencées.

Réclamation des citoyens Soufflot et Pomet contre cet étaiement.

Les inspecteurs généraux des pons et chaussées sont chargés de donner leur avis.

59. En conséquence, le ministre écrivit, le 29 germinal, aux citoyens de Cessard, le Brun, Gauthey, Lamblardie, Besnard, Lamandé et Rolland, inspecteurs généraux des ponts et chaussées, de se rendre au Panthéon le lendemain avec les citoyens Rondelet, Chalgrin, Brongniard et Gondouin, pour y visiter le dôme sur la solidité duquel on lui avoit donné des inquiétudes, et de lui faire part du résultat de cet examen aussitôt qu'il seroit terminé.

60. Cette visite eu lieu au jour indiqué; les inspecteurs généraux examinèrent attentivement les piliers qu'ils trouvèrent fort dégradés, et jugèrent, ainsi que les architectes, que ces dégradations provenoient du tassement qui avoit dû être fort grand sous un poids aussi considérable que celui dont les piliers étoient chargés. Ils prirent pour s'en assurer, les niveaux de ces piliers, en les comparant avec les autres parties de l'édifice qui n'avoient pas dû tasser autant, et reconnurent qu'ils s'étoient affaissés assez considérablement, mais ils ne crurent cependant pas, malgré ce grand tassement, que le danger fût aussi pressant qu'on le présumoit. Ils prirent des informations auprès des commis et ouvriers, pour connoître les détails de la construction que l'on avoit suivie, soit en élevant les piliers, soit dans les réparations qu'on y avoit faites.

Ils y retournèrent une seconde fois avec les mêmes architectes et l'entrepreneur, et firent jeter à bas une partie du parement d'une colonne qui étoit fort dégradée, afin de connoître si les éclats de pierre s'étendoient fort loin, et après plusieurs conférences et discussions qu'ils eurent entr'eux sur divers moyens qui furent proposés pour remédier au mal, quoiqu'ils fussent d'accord avec les architectes sur la cause générale de ces dégradations, ils ne le furent pas de même sur les moyens de les faire cesser.

61. Les architectes consultés proposoient d'abord de ceintrer les arcs-doubleaux, et de consolider ensuite les deux côtés de chaque pilier, en y ajoutant des murs plaqués et liés aux piliers; mais seulement jusqu'à l'entablement de l'ordre, parce que les dégradations s'étoient encore peu étendues au delà. Les ingénieurs pensèrent que le moyen proposé qui supprimoit les douze colonnes les plus proches du dôme, détruiroit toute la belle architecture de cet édifice, qu'il ne suffiroit pas pour donner aux piliers et aux colonnes la solidité nécessaire, et que quand on pourroit parvenir à rendre solide cette partie des piliers, les dégradations pouvoient se continuer au-dessus de l'entablement et même dans les arcs, ce qui leur parut très-dangereux. Ils détaillèrent leurs motifs dans un rapport qu'ils firent au ministre, où ils proposèrent aussi d'étayer le dôme, mais par de forts arcs-boutans en maçonnerie qui devoient porter sur les pans-coupés pratiqués à la jonction des murs de long-pan, lesquels peuvent servir eux-mêmes à résister aussi à la poussée de ces arcs-boutans.

Différens moyens proposés par les architectes et les ingénieurs.

Ils crurent que ces arcs-boutans pouvoient même être suffisans pour porter toute la partie du dôme qui est au-dessus des piliers; parce que ne portant plus alors que leur propre poids, ils pourroient être réparés avec la plus grande facilité : et pour éviter tout tassement ultérieur, ils proposèrent de dresser au grai les joints de toutes les pierres de ces nouvelles constructions, et de les poser sans cales ni mortier, comme le faisoient les anciens Romains.

Commission de six artistes.

62. Les architectes répondirent par un autre mémoire, et comme ils n'étoient pas d'accord sur quelques démonstrations mathématiques concernant le poids que devoient porter différentes parties des piliers, et sur la direction des poussées des arcs-boutans, le ministre nomma une commission composée de deux mathématiciens, de deux architectes et de deux inspecteurs généraux des ponts et chaussées, pour lui donner leurs avis sur les différentes propositions qui avoient été faites.

Seconde commission de cinq artistes pour donner leur avis.

63. Après plusieurs visites et conférences, cette commission ne put pas s'accorder sur le meilleur parti à prendre; les architectes persistèrent dans leur avis, les inspecteurs généraux dans le leur, et les mathématiciens, sans blâmer aucun des projets, n'en adoptèrent non plus aucun sans quelque restriction. Ils ne s'expliquèrent pas sur les questions mathématiques pour lesquelles il paroît qu'on les avoit consulté particulièrement; de sorte que le ministre restant dans la même indécision qu'auparavant, il a pris le parti de nommer une nouvelle commission de cinq personnes, mathématiciens, architectes et ingénieurs pour le déterminer sur le parti qu'il y auroit à prendre.

CHAPITRE II.

Etat des dégradations des piliers, et leurs causes.

---

64. AVANT que d'entrer dans l'examen des différens projets proposés, il est nécessaire de constater exactement l'état actuel de ces piliers et du dôme, c'est ce qui a été fait et souvent contradictoirement, tant par les architectes, que par les ingénieurs généraux des ponts et chaussées.

L'on indiquera ensuite la manière dont les maçonneries ont été construites, d'où l'on pourra connoître sûrement les causes des dégradations, ensuite les effets qui peuvent encore en résulter, ce qui fera probablement déterminer la meilleure manière d'y remédier.

65. Quoique la surface du plan de ces piliers soit très-petite, eu égard à celle de tous les autres dômes que l'on a construits jusqu'à présent, il est cependant bien certain que cette surface est plus que suffisante pour porter un poids beaucoup plus considérable que le dôme du Panthéon, et les architectes même en conviennent. Les expériences que l'on a faites sur le poids que pouvoit porter chaque pied quarré de la pierre dont ce dôme est construit, ne laissent aucun doute à cet égard. Cependant je les ai encore répétées sur la même pierre, et j'ai trouvé que l'on pouvoit conclure avec assurance que le pied quarré pouvoit porter plus de 1,000,000 liv. avant que de s'écraser en entier, et au moins 500,000 liv. avant que de se fendre. J'ai aussi calculé le poids du dôme et des piliers que j'ai trouvé (136) 32,077,353 l. sur les forces des colonnes; et de 30,100,169 liv. à la hauteur du tiers de la colonne où se sont manifestées les plus grandes dégradations; de sorte que la charge de chaque pilier, à cet endroit,

Les piliers sont suffisans pour porter le dôme.

est de 7,525,042 liv. La surface du plan du pilier et des colonnes est au même endroit de 135 pieds $\frac{671}{1000}$; ainsi la charge sur chaque pied quarré, est de $\frac{7525042}{135671}$ liv. = 55,465 liv., qui est 10 à 11 fois moindre que la moindre charge qu'il pouvoit porter d'après les expériences ci-dessus, sans se fendre, et plus de 20 fois moindre que ce que les pierres pouvoient porter sans s'écraser.

Cependant la charge qu'ils portent les a dégradé considérablement.

66. Malgré ces calculs qui sont incontestables, et d'après lesquels Soufflot s'est sans doute déterminé à élever un dôme beaucoup plus considérable que celui qu'il avoit projeté d'abord, il n'en est pas moins vrai que les piliers ont soufferts, et que la plupart des pierres se sont fendues et éclatées sous une charge plus considérable que celle qu'elles peuvent porter. Il est donc question d'en connoître la raison, et on ne peut certainement l'attribuer qu'à quelque vice de construction; c'est ce dont les inspecteurs généraux des ponts et chaussées cherchèrent à s'assurer avec soin.

État des dégradations.

67. Ils examinèrent avec attention toutes ces dégradations, et reconnurent qu'il y avoit une très-grande quantité de pierres fendues, la plupart verticalement, quelques-unes dont les fentes ou fissures se trouvent très-proches les unes des autres, mais la plupart cependant assez éloignées, et quelques-unes formant lésardes avec les joints des pierres au-dessus et au-dessous. Les colonnes sur-tout étoient beaucoup plus maltraitées que les faces droites des piliers, et elles paroissoient sur-tout fendues dans de grandes hauteurs à leur jonction avec le pilier. L'une de ces colonnes avoit de fortes lésardes vers le tiers de sa hauteur, et boucloit fortement dans quelques parties. Outre les fentes, il y avoit encore beaucoup d'éclats ou de fortes épanflures de 2, 3 et 4 pouces de profondeur, quelques-unes étoient détachées et tombées; mais quelques-autres n'étoient marquées que par deux fentes légères, et on ne les reconnoissoit le plus souvent qu'en les frappant avec le marteau. On leur fit aussi remarquer que

plusieurs pierres avoient été replacées dans les faces des piliers et dans les colonnes, mais sur-tout dans les piliers.

68. Ils avoient d'abord cru au premier aspect, qu'il y avoit dans les colonnes une fente ou fissure par pied quarré, mais dans la suite on s'est assuré plus positivement de ces effets. Deux commissaires, l'un ingénieur et l'autre architecte, comptèrent dans le pilier qui avoit le plus tassé, celui à gauche dans le fond, le nombre de ces fentes, éclats et pierres replacées, et ils trouvèrent qu'aux colonnes il y avoit moyennement une fente ou éclat sur deux pieds quarrés, et aux piliers une fente ou éclat sur six pieds, comme on peut le voir dans la table ci-dessous, où l'on remarque, 1°. que les fissures sont beaucoup plus multipliées que les éclats,

RÉCAPITULATION des éclats, fentes et pierres remplacées.

LE PILIER.			LES COLONNES.			
ÉCLATS.	FENTES.	PIERRES remplacées.	ÉCLATS.	FENTES.	PIERRES remplacées.	
le haut. le bas.	le haut. le bas.	le haut. le bas.	le haut. le bas.	le haut. le bas.	le haut. le bas.	
6......16.	98.... 49.	110......344.	18.... 15.	63.... 73.	14.......27.	Le pan coupé
12.	15.... 23.	61......166.	14.... 13.	20.... 86.	2.......43.	Face du côté de l'Est.
4.	40.... 09.	56......200.	7.... 22.	50.... 53.	0...... .76	Face du côté du Nord.
6.. ...32.	153.... 81.	227.....710.	39.... 50.	133... 212.	16......145.	
38.	234.	937.	89.	345.	162.	
272.		162.	334.		Pilier 227 710.	
		1099.			Colon. 1 146	
					243 856.	
					1099.	

et que ce rapport est de 1 à 4 dans les colonnes, et de 1 à 6 dans les parties droites des piliers.

2°. Que l'on a remplacé dans ce pilier environ 1,100 pieds quarrés de pierres, dont 800 en 1789 et 1790, et 300 en l'an 3 et l'an 4 de la république; ce qui fait un peu plus de deux cinquièmes du total, la surface du parement de ces piliers, dans la hauteur des colonnes, étant de 2,512 pieds.

69. On remarque encore dans cette table, que les éclats, fentes et pierres remplacées sont beaucoup moins multipliées dans la partie supérieure au dessus de l'importe sur 15 pieds de hauteur, que dans la partie inférieure sur 22 pieds de hauteur. Ce rapport est comme 5 à 8, et s'il y a plus de pierres remplacées dans les piliers que dans les colonnes, c'est qu'on n'en a point remplacé dans celles-ci pendant les années 3 et 4 de la république, tandis qu'on en a remplacé beaucoup dans les piliers.

Descriptions outrées qu'en ont faites les architectes.

70. Les architectes, dans tous leurs rapports, paroissent n'avoir cherché qu'à donner les plus grandes alarmes sur le sort de cet édifice; ils ont annoncé que les fentes étoient incalculables, et dans des directions suivies que les architectes en ont faites; que les colonnes engagées sont détachées de leurs massifs par des fentes continues et fracturées; qu'elles sont fendues et broyées dans presque toute leur hauteur; qu'elles sont continuées jusqu'aux chapiteaux qui s'écrasent; que les architraves se brisent; que les piliers sont dans un état déplorable, que le péril est imminent, le mal pressant, la vie des citoyens, la gloire nationale en danger; que c'est dans le moment même qu'il faut commencer ces réparations; que l'édifice du siècle et la réputation des artistes françois vont s'écrouler avec la gloire de Soufflot; qu'il est tems encore de réparer, mais que peut-être n'y a-t-il plus que le tems nécessaire.

Détail au vrai de ces dégradations.

71. Toutes ces descriptions sont outrées, les fentes ne sont pas incalculables, puisqu'il n'y en a qu'une au plus sur 3 pieds $\frac{1}{2}$ quarrés. Quoique les colonnes soient assez maltraitées, elles ne sont cependant point détachées de leur massifs, et s'il y a une fente

fente continue dans la jonction de quelques-unes de ces colonnes avec les piliers, c'est qu'il y a un joint continu dans l'angle, mais il n'y a aucune pierre broyée ni véritablement écrasée. Deux colonnes sont effectivement fendues assez considérablement et crevassées, mais seulement dans une petite partie de leur hauteur. A l'égard des piliers, ils ont peu de mal, ils n'ont aucune fente qui ait plus d'une ligne de largeur, et ce qui prouve invinciblement que les craintes que l'on avoit ne sont pas fondées, c'est que depuis plus d'un an, il ne s'est fait aucun progrès quelconque sur ces piliers.

72. Le mal paroît néanmoins considérable aux personnes qui ne sont pas au fait des grandes constructions; quelques colonnes sur-tout présentent presque l'apparence d'une ruine antique, mais il y a peu de mal aux piliers qui sont les véritables soutiens du dôme, et le mal n'est même qu'à la superficie; le noyau est bon et peut tout soutenir.

Nivellement des bases et des corniches des piliers.

73. Afin de constater exactement tous les effets qui sont arrivés depuis la construction du dôme, les mêmes commissaires firent avec le plus grand soin le nivellement sur les angles des bases et sur les angles saillans des corniches répondant aux seize colonnes qui soutiennent les faces des tribunes joignant les piliers, en commençant par le pilier à gauche en entrant, et continuant par le pilier à gauche du fond, ensuite par celui à droite du fond, et par celui à droite en entrant.

Et prenant pour ligne de niveau l'angle le plus élevé des corniches qui se trouve sur la douzième colonne, et l'angle le plus élevé des socles des bases qui se trouve aussi à cette douzième colonne, l'on trouve que si toute les bases et toutes les corniches ont été placées au même niveau dans la construction, le tassement le plus fort sur les bases n'a été que de six lignes, et que sur les corniches il a été de 65 lignes $\frac{1}{2}$ ou près de 5 pouces $\frac{1}{2}$; que les colonnes engagées dans les piliers ont beaucoup plus baissé que celles qui soutiennent les tribunes dont le plus grand tassement

n'a été que depuis 1 ligne ½ jusqu'à 8 ½, tandis que le tassement des colonnes engagées a été depuis 37 lignes ½, jusqu'à 65 ½.

74. Le citoyen Rondelet avoit fait, avant la construction du dòme, un nivellement qu'il avoit comparé avec la colonne d'angle rentrant à droite à l'extrémité de la nef méridionale, et il avoit trouvé que le tassement au premier pilier avoit déja été de 21 lignes ½, au second de 27 lignes ½, au troisième de 23 lig. ½, et au quatrième de 19 lignes ½. Ce point de repaire est à 10 lig. au-dessous de celui que les commissaires ont pris.

Résultat des nivellemens.

75. Il résulte de là que depuis la construction du dôme le premier pilier a encore tassé de 7 lignes ½, le second de 26 lignes ½, le troisième de 23 lignes ½, et le quatrième de 12 lignes; de sorte que les piliers du fond qui avoient déja beaucoup plus tassé que ceux du dôme, ont encore tassé depuis davantage que ceux-ci.

TABLEAU

Du nivellement des bases et des corniches joignant le dôme.

	Colonne de re paie.	Premier pilier à gauche en entrant.	Second pilier à gauche dans le fond.	Second pilier à droite dans le fond.	Premier pilier à droite en entrant.
N°. des colonnes. . . .	0.	1, 2, 3, 4	5, 6, 7, 8	9, 10, 11, 12	13, 14, 15, 16
Hauteur des bases sur la ligne de niveau. . .	4.	lig. 3½, 4, 1, 0	1½, 4½, 0½, 5	5, 3, 1½, 0	6, 5, 3, 6
Hauteur des corniches sous la ligne de niveau.	10.	5½, 37½, 40½, 8½	1½, 65½, 62½, 3	7, 57½, 56½, 0	3, 42½, 40½, 4½

Nota. On a pris aussi la différence du niveau de l'un des arcs-doubleaux qui s'appuie sur les colonnes isolées qui portent les tribunes, et sur les colonnes engagées dans les piliers, et l'on a trouvé une différence de 4 pouces.

Avant la construction du dôme, le tassement moyen avoit été de 23 lignes, et depuis il a été de 17 lignes $\frac{1}{2}$.

Le plus grand tassement avoit été de 27 lignes $\frac{1}{2}$, et depuis il a été de 26 lignes $\frac{1}{2}$.

Les piliers du devant n'ont pas baissé la moitié autant depuis qu'avant la construction du dôme; ceux du derrière ont baissé à-peu-près autant.

En prenant le nivellement sur le milieu des pans coupés, on trouve que l'entablement sur la colonne de repaire est au dessus du premier pilier, de 29 lignes $\frac{1}{2}$; au-dessus du second, de 54 lignes $\frac{1}{2}$; du troisième, de 47, et du quatrième, de 31 lignes $\frac{1}{2}$; ainsi la plus grande différence est de 25 lignes, et celle entre deux piliers opposés, est de 23 lignes, de sorte que si les niveaux et les à-plomb avoient été bien observés, le dôme devroit pencher de 23 lignes, sur 74 pieds de hauteur, ou de 11 lignes $\frac{1}{2}$ sur la hauteur de l'ordre extérieur.

76. Pour voir si ces tassemens continueroient et s'il se feroit même de nouvelles fentes ou éclats, ou si celles qui existent n'augmenteroient pas, on a fait remplir les unes en plâtre; l'on a collé du papier sur d'autres, mis des plaques de pierres minces en queue d'aronde sur d'autres, et marqué avec un compas deux points à distance fixe de part et d'autre de plusieurs de ces fentes; l'on a aussi fait ajuster trois règles qui forment la hauteur juste de 37 pieds et demi entre l'architrave et le socle dans les pans coupés, afin de les présenter de tems en tems et reconnoître si le tassement augmenteroit.

Précautions prises pour connoître s'il se feroit encore quelque tassement.

77. L'on a examiné à différens tems si les règles entroient toujours avec facilité dans les entailles, si les papiers se déchiroient, si les plaques de pierre en queue d'aronde se cassoient, enfin si les joints de plâtre se fendoient. Après neuf mois deux commissaires ont été chargés de reconnoître s'il étoit arrivé quelques nouveaux événemens aux piliers, et ils ont reconnu que sur 332 papiers collés et 6 queues d'aronde, il n'y avoit eu que

Pendant 9 mois il ne s'est fait aucun tassement ni aucune fente sur les piliers

trois papiers déchirés en entier, et huit déchirés en partie, mais sur les parties crevassées des colonnes seulement; que sur le reste des colonnes et piliers il n'existoit aucun papier déchiré ni aucune marque qui fît soupçonner qu'il y eût eu le moindre mouvement ni la moindre augmentation dans les fentes.

78. Les parties crevassées des colonnes n'ont pas même travaillé autant que l'on devoit s'y attendre, et l'on auroit dû depuis long-tems faire tomber ces parties en surplomb qui ne soutiennent rien et pourroient aisément tomber quand même elles ne seroient pas chargées.

79. L'on a aussi replacé les trois règles dans les entailles, et par un tems humide, l'on a trouvé que la distance entre ces entailles étoit de $\frac{1}{7}$ de ligne plus courtes que lorsqu'on les avoit jaugées, mais ayant recommencé l'expérience par un tems sec, à-peu-près pareil à celui où on les avoit coupées justes, elles se sont trouvées un peu plus longue, de sorte que l'on peut être assuré que pendant neuf mois il n'y a eu aucun tassement quelconque.

Tassement qui s'étoit fait avant la construction du dôme.

80. Le tassement qui s'est fait sur les piliers avant la construction du dôme, qui étoit d'une demi-ligne environ par pied de hauteur, n'excède pas le tassement ordinaire des murs de la hauteur de ceux-ci, et il n'est pas étonnant qu'une surcharge aussi considérable que celle d'un dôme, équivalente à 350 pieds de hauteur au-dessus des piliers, ait doublé ce tassement ordinaire.

Il n'y a pas eu de tassement inégal sur les fondations.

81. Ce tassement extraordinaire n'a pu provenir que de deux causes, ou de ce que le terrein auroit cédé à la compression, ou de ce que les mortiers qui sont entre les pierres ont été réduits à un moindre volume. L'on a en conséquence examiné s'il n'étoit arrivé aucune disjonction au mur circulaire construit en fondation contre les piliers, et l'on n'y a absolument rien remarqué, ce qui fait penser que si le terrein des fondations a cédé, il a cédé par tout également, car si cela n'eût pas été, la partie du mur circulaire qui ne porte rien, auroit cédé moins que celui qui est sous les piliers.

82. L'on a reconnu en faisant les réparations, que les fentes parallèles aux paremens ne se faisoient guère plus loin qu'à 5 à 6 pouces au-delà de ces paremens, et que les pierres que l'on a remplacées n'avoient guère que cette largeur de lit; quelques-unes cependant ont 8 à 9 pouces. La plupart des fentes se font perpendiculairement au parement ou inclinées sur un angle plus ouvert que 45 degrés.

Fentes parallèles aux paremens.

83. Les ingénieurs n'avoient rien négligé pour prendre les informations les plus exactes sur la manière dont ces piliers avoient été fondés et construits dans toutes leurs parties; ils ont pris les déclarations de l'entrepreneur, des commis et même des ouvriers qui y ont travaillé, et ils se sont assurés par là que les piliers étoient fondés sur des massifs de pierres de taille qui avoient quatre à cinq fois plus de surface que le plan des piliers, et qu'ils étoient liés avec d'autres massifs en moëlons tous établis sur de grandes pierres de taille; que le sol sur lequel sont établies ces fondations est un sable vif, condensé et qui paroissoit incomppressible; que l'on a d'abord établi dans toute leur étendue, des massifs de libage et deux assises dans les entre-colonnemens; que sous les piliers, le massif de libage avoit été fait en plein avec des empâtemens de plus de huit pieds en avant et de deux pieds et demi tout à l'entour des piliers et colonnes, ce qui donne à cette fondation en pierre de taille, sur 24 pieds de hauteur, près du double de la surface de ces piliers, d'où il est aisé de voir que ce terrein n'a pu fléchir d'une manière sensible, et que la maçonnerie a dû tasser beaucoup moins que celle qui est au-dessus des fondations; aussi a-t-on vu que le plus grand tassement des bases n'a été que de 5 lignes sur 24 pieds de hauteur, et que celui des piliers a été de 66 lignes sur 48 pieds, ce qui est six fois plus considérable.

Informations prises sur la manière dont les fondations ont été faites.

84. A l'égard de la manière dont les pierres ont été posées, on a suivi la méthode la plus en usage à Paris, même pour les ouvrages importans; on a laissé sur le bord de chaque pierre joignant les paremens, une bande lisse de 4 à 5 pouces de largeur, et l'on a

Manières dont les pierres ont été posées.

démaigri le reste des lits de 4 à 5 lignes, de sorte que l'épaisseur des pierres à la queue, est de 8 à 9 lignes moindre que sur le devant, afin de recevoir le mortier, et de donner la facilité de le ficher.

85. Le noyau des piliers a été formé avec des pierres de même qualité que les paremens, remplissant tout le vuide, et ayant la même épaisseur que le derrière des pierres de parement, de sorte qu'il y a autant d'épaisseur de mortier entre ces pierres de noyau qu'entre la queue des pierres de parement. On n'a point observé de plumées à ces pierres du noyau, on a seulement rustiqué leurs lits comme les lits démaigris; les pierres de parement ont été posées sur cales jaugées à deux lignes d'épaisseur, pour être placées entre les plumées; les cales de derrière avoient six à neuf lignes d'épaisseur; elles étoient ensuite fichées jusqu'à ce que le mortier fît soulever la pierre. Les libages de remplissage étoient posés sans cales sur un lit de mortier, et mis à la même hauteur que les queues des pierres de parement; ils étoient ensuite frappés à la hie, et les joints montans coulés exactement en mortier. Lorsqu'il y avoit quelque défaut dans le taillage des lits, et qu'ils s'approchoient de trop près sur le devant, on les élargissoit avec la scie sur deux ou trois pouces de profondeur, pour que les joints sur le devant eussent tous la même largeur. Les pierres de fondation ont été posées comme celles-ci, mais sans démaigrissement sur le derrière, ni plumées sur le devant, attendu que les faces étant enveloppées dans des massifs sur le devant, ne sont pas apparentes.

86. Quoique l'on ait pris pour tout l'édifice les mêmes soins, cependant on en a pris encore davantage pour les piliers et les colonnes, que pour les gros murs qui ont été construits en grande partie à la tâche, tandis que les piliers et les colonnes ont tous été posés à la journée.

Sentiment de M. Patte sur

87. L'exposé de l'entrepreneur et des ouvriers s'est trouvé absolument conforme à ce qu'avoit écrit M. Patte dans ses mémoires

d'architecture, dans lesquels il donne les plus grands éloges à la manière dont les fondations et les murs ont été élevés jusqu'au dôme. Il explique dans le plus grand détail tous les procédés qui ont été suivis, et finit par dire qu'il est rare de les voir opérer avec la suite d'attention que l'on y a mise, et que d'ailleurs il est toujours important de remettre sous les yeux les excellentes pratiques. ces constructions.

88. Cependant quoique les dépositions de l'entrepreneur, des commis et des ouvriers qui avoient travaillé à ces piliers fussent uniformes, et que le témoignage de M. Patte ne fût rien moins que suspect, on a soutenu dans la suite que ces piliers avoient été construits sans soins, qu'il existoit des vuides considérables dans l'intérieur, que les pierres avoient été mal fichées, ce dont on s'étoit apperçu, disoit-on, en faisant les incrustemens aux piliers, où l'on avoit fait entrer des sceaux de mortiers dans les joints.

On a prétendu qu'il y avoit eu de grandes négligences dans cet ouvrage.

89. Le cit. Brachet, ci-devant tailleur de pierre, qui disoit avoir travaillé à ces piliers, écrivit qu'il avoit souvent gémi avec le citoyen Rondelet, du mauvais systéme de construction que l'on avoit suivi; que dans la partie des pierres de taille qui joint les libages, il y avoit jusqu'à un pouce et demi de mortier de plus que sous ces mêmes libages.

90. Toutes ces assertions étoient importantes à vérifier; deux constructeurs s'étoient chargés de faire des sondes, et prétendoient qu'ils sauroient bien connoître s'il y avoit des vuides ou de grandes épaisseurs de mortier. Ils firent au trépan des trous de 3 à 4 pieds de profondeur sur 2½ pouces de diamètre, qui ne donnèrent aucun indice ni de vuide, ni de grands joints; enfin comme on ne pouvoit pas s'accorder sur la manière dont la construction avoit été faite, par la contrariété des dépositions du citoyen Brachet et des commis et ouvriers, les ingénieurs proposèrent au ministre de faire arracher une douzaine de pierres de parement jusqu'au noyau, pour reconnoître la largeur des joints et s'assurer si

Epreuves infructueuses pour le connoître, faites au trépan.

effectivement il y avoit des vuides comme l'annonçoit le citoyen Brachet.

Sondes faites pour reconnoître la manière dont les constructions avoient été faites.

91. Ces sondes furent faites non sans quelques contradictions : on ne fit que quatre arrachemens au lieu de six que l'on avoit proposés, parce qu'on trouva par-tout uniformément comme on devoit s'y attendre, les joints fort grands au-delà des plumées, et depuis 4 lignes jusqu'à 12, et moyennement de 8 lignes; on en trouva même un de 16 lignes et un de 18 lignes sur une petite étendue; mais l'on ne trouva aucun vuide quelconque dans 40 joints formant plus de 90 pieds de longueur que l'on a découverts.

92. Quoique l'on eût montré beaucoup d'opposition à ce que l'on fît ces arrachemens, parce que, disoit-on, il étoit très-dangereux que l'ébranlement n'augmentât les dégradations; cependant il n'en arriva aucune, les fentes n'augmentèrent pas de largeur, et il ne se fit aucun tassement.

Deux espèces de dégradations.

93. Toutes ces dégradations se réduisent à deux espèces; les premières sont de fortes épaufrures ou des paremens de pierre qui se détachent en entier, quelquefois sur deux ou trois pouces d'épaisseur et tombent, ou qui se fendant parallèlement aux paremens sur 4 à 5 pouces d'épaisseur, restent attachés aux massifs, mais ne contribuent pas beaucoup à leur solidité.

La seconde espèce de dégradations consiste dans des fentes la plupart verticales ou peu inclinées, presque toutes à-peu-près perpendiculaires aux paremens, et s'étendant dans toute la largeur des pierres; celles-ci ont pour cause principale les cales qui sont placées sur le lit supérieur des pierres, vis-à-vis une partie du lit inférieur qui n'est rempli qu'en mortier, et qui tassant davantage que les cales, forment un véritable porte-à-faux; la plupart de ces fentes ont lieu vers le milieu des pierres, et il y en a peu qui soient fendues en deux endroits proche l'un de l'autre, si ce n'est à quelques parties des colonnes. Les fentes qui sont dans les pierres des piliers ne diminuent pas beaucoup la solidité

des

des maçonneries ; elles produisent seulement le même effet que si la moitié des pierres que l'on a employées eussent eu moins de longueur de parement, ce qui ne seroit pas un vice de construction, l'on auroit donc pu se dispenser de les changer, si ce n'est lorsque les fentes étoient très-proches les unes des autres.

94. A l'égard des éclats, ils proviennent de ce que les joints des paremens n'ayant que le quart de l'épaisseur de ceux du derrière des pierres, ils parviennent bien plutôt au maximum de la compression dont ils sont susceptibles, et alors ils portent seuls la majeure partie du fardeau proche de leurs arrêtes qui sont alors sujettes à s'éclater très-facilement, mais ces éclats sont moins multipliés que les fentes, puisque dans les faces des piliers il y en a six fois moins que de fentes ; comme ils ne s'étendent pas au loin, leur surface en plan n'est guère que la deux centième partie de celle du plan de ces piliers, et lorsque ces éclats sont détachés, l'assiette sur laquelle reposent ces pierres étant alors plus grande, elles ne risquent plus de s'éclater.

95. Ces faits ayant été constatés contradictoirement, il n'étoit pas difficile de reconnoître la cause de toutes les dégradations qui sont arrivées à ces piliers ; il est bien évident qu'elles proviennent uniquement du systême de construction qu'on avoit adopté pour poser les pierres avec de grands joints sur le derrière et de petits joints sur le devant. En démaigrissant ces pierres de plusieurs lignes à la queue, et posant celles du noyau avec des joints aussi grands que ceux de la queue des pierres de parement, il en est résulté que le mortier qui est susceptible d'un certain degré de compression, relativement au poids dont il est chargé, a diminué d'épaisseur jusqu'à ce qu'il soit parvenu au maximum de cette compression, et ce n'est qu'alors qu'il a porté complettement. Cause de ces dégradations.

96. Les joints de lit de devant qui n'avoient que deux lignes d'épaisseur, y sont parvenus les premiers, alors ce sont ces joints seulement qui ont porté la plus grande partie du fardeau ; les autres parties qui n'ont pas encore pris leur tassement complet, Le pourtour des piliers porte presque toute la charge.

peuvent bien soulager le poids, mais elles n'empêchent pas que la plus grande charge ne se porte sur les mortiers comprimés complettement, et sur les cales qui parviennent encore plutôt que le mortier au maximum du degré de compressibilité. Alors au lieu de la surface totale du plan des piliers, qui avoit été destinée à porter tout le fardeau, il ne se trouve réellement que le pourtour de ces piliers sur 4 à 5 pouces de largeur qui le porte presque en entier, et dans ce pourtour même, les cales qui tassent moins que le mortier, sont la partie qui porte la plus grande charge; alors cette surface portante n'étant pas à beaucoup près en proportion avec la charge totale, a commencé par se fendre vis-à-vis des cales, et à former plusieurs lésardes, ensuite les arrêtes des paremens ont éclatés, et se sont détachées de la masse, ce qui lui a donné l'apparence d'une ruine complette; le tassement en a dû augmenter successivement, et a fait craindre à quelques architectes que la masse du pilier ne s'écrasât et que le dôme ne s'écroulât entièrement.

La pierre que l'on a employée est très-sujette à s'éclater.

97. A cette cause, on doit encore en ajouter une autre non moins réelle provenant de la nature de la pierre du fond de Bagneux, que l'on a employée dans la partie où se sont faites les plus grandes dégradations. Cette pierre est fort dure et pèse 166 livres le pied cube, mais elle est ce que les ouvriers appèlent *fière*, c'est-à-dire, qu'en la taillant elle s'éclate aisément comme le verre; elle se fend encore d'autant plus facilement, qu'elle n'a que onze pouces d'épaisseur. La pierre de Mont-Souris que l'on a employée au-dessus de l'imposte, et qui a 22 pouces d'épaisseur, quoique un peu moins dure que celle du fond de Bagneux, s'éclate beaucoup moins, et ne pèse que 156 liv. le pied cube.

Motifs qui déterminent ordinairem. à mettre beaucoup de mortier dans les joints.

98. On peut conclure de ces observations, que l'on a eu tort de suivre dans cette construction le système de poser les pierres sur une grande épaisseur de mortier. Ce système n'a sans doute été imaginé que parce qu'on s'est apperçu que lorsque les pierres n'étoient pas posées sur une couche de mortier un peu épaisse,

elles s'éclatoient facilement sur leurs arrêtes, et parce qu'il est extrêmement difficile de tailler les lits des pierres de façon que ces lits soient parfaitement plats : deux pierres posées l'une sur l'autre sans aucun intermédiaire de mortier, pour peu qu'elles soient gauches, ne portent souvent l'une sur l'autre que dans trois points, quelqu'étendue qu'elles aient. Alors il est aisé de juger qu'elles doivent avoir fort peu de résistance et peuvent se casser très-facilement; si l'un des trois points porte sur une partie de la pierre inférieure qui n'est pas portée elle-même, cette pierre inférieure doit se casser d'autant plus facilement, que la résistance des pierres à être cassées est beaucoup moindre que celle qu'elles opposent à être écrasées. J'ai encore fait des expériences sur cet objet, que l'on trouvera dans le journal de physique, du mois de novembre 1774, et où l'on verra qu'une pierre chargée entre deux appuis ne porteroit souvent pas la douzième partie du poids qu'il faudroit pour l'écraser.

99. Le mortier se comprimant par une gradation insensible, forme une espèce de matelas sur lequel les pierres reposent à-peu-près également sur toute leur superficie, ou du moins s'il y a quelques parties gauches qui s'approchent plus du lit des pierres inférieures que d'autres, le mortier cède, et cette partie ne portant pas immédiatement sur la pierre inférieure, ne peut s'éclater. Les cales que l'on met plus ou moins épaisses pour raccorder l'intervalle qui reste entre les lits, cédant moins que le mortier, font quelquefois fendre les pierres, et les bons constructeurs les font même mettre en bois tendre qui se comprime autant que le mortier; il seroit encore mieux de les ôter lorsque les pierres sont fichées.

100. Ce système peut être suivi sans inconvénient pour des édifices ordinaires qui n'ont pas une assez grande charge pour que les pierres puissent s'éclater sous le poids. On le prescrit ordinairement dans les devis, en disant que les pierres seront posées à bain de mortier; cet usage s'est établi par la difficulté que l'on

Ce système peut sans inconvénient être suivi dans des constructions ordinaires.

éprouve à faire former aux ouvriers des lits exactement plats, parce que la perfection dans les arts étant toujours très-difficile à atteindre, la dépense du taillage des lits coûteroit autant et plus que les paremens, tandis qu'il est d'usage de ne les pas payer, parce qu'on les taille avec peu de soin, au lieu qu'avec des cales plus ou moins épaisses on parvient toujours à poser les pierres dans leur place. Le démaigrissement par derrière s'est encore établi parce que sans cela il est difficile de remplir exactement les joints en les fichant.

Il en résulte un tassement qui souvent n'est pas nuisible.

101. Il résulte de la grande épaisseur de mortier que l'on met entre les joints, que les murs tassent ou diminuent de hauteur peu après leur construction, ce qui n'est pas un grand inconvénient dans un ouvrage ordinaire, parce que l'on a soin d'avoir égard à ce tassement dont on connoît la quotité par expérience; mais cet usage étoit d'autant moins applicable à la construction du dôme du Panthéon, que l'on n'a peut-être jamais construit d'édifice où les points d'appui aient porté un plus grand poids relativement à leur surface (*).

Le dôme du Panthéon n'étant pas un édifice isolé, il devoit en résulter des inconvéniens.

102. Il est encore à considérer que ce dôme n'est point un édifice isolé, puisqu'il est lié aux quatre voûtes de la nef, aux huit voûtes des tribunes et aux quatre autres voûtes qui sont derrière, ainsi qu'à seize plattes-bandes, toutes constructions qui ne portent rien et qui par conséquent doivent bien moins tasser que lui; il doit donc nécessairement se séparer de toutes ces parties, puisque son tassement doit être beaucoup plus grand que celui de tout le reste de l'édifice.

Moyens que l'on auroit pu

103. On n'auroit pu éviter cet inconvénient qu'en suivant un

(*) L'on verra ci-après que chaque pilier porte 8,015,488 liv.; que leur surface à la base est de 137 pieds, par conséquent chaque pied quarré porte 58,508 livres; et comme chaque pied cube de pierre pèse moyennement 152 liv., il s'en suit que le poids que porte chaque pilier, est égal à une maçonnerie de 385 pieds de hauteur. L'on a construit des édifices qui ont plus de 400 pieds de hauteur, mais ils ont tous une forme pyramidale, et l'on doute que l'on en ait construit aucun qui soit plus chargé que celui-ci.

autre système de construction, ou, si l'on vouloit suivre celui-ci; qu'en construisant le dôme beaucoup plutôt que le reste de l'édifice, ou en ne le liant pas avec les voûtes et les plattes-bandes voisines, ce qui eût été assez difficile. Si on avoit voulu remédier à l'excès du tassement qu'il devoit avoir sur celui des parties contigues, on auroit pu donner à celles-ci un peu moins de hauteur, c'est ce qu'on fait pour les arches des ponts à qui l'on donne une plus grande hauteur que celle qu'elles doivent avoir, parce que l'on sait par expérience de combien elles doivent baisser.

prendre pour éviter le tassement.

104. Mais pour éviter de se servir de tous ces moyens qui ne sont que des palliatifs dont la plupart ne sont rien moins que faciles à exécuter, et qui ont d'autres inconvéniens, il n'y avoit pas d'autre parti à prendre pour des piliers qui devoient être aussi chargés que ceux du dôme du Panthéon, que de faire tailler les lits de toutes les pierres parfaitement plats et sans aucun gauche; en les usant même au grez; le taillage auroit été plus cher, mais le succès eût été certain.

105. C'est de cette manière que les Romains et d'autres anciens peuples bâtissoient tous leurs grands ouvrages; il nous en reste encore beaucoup d'exemples, même en France; il est bien étonnant que cet usage ait été presque totalemeut abandonné chez nous depuis long-tems.

Moyens de bâtir des Romains qu'il falloit adopter.

Lorsque la pierre est dure telle que celle que l'on a employée aux colonnes et aux piliers, et qu'elle porte dans toute sa superficie, elle est capable d'une résistance immense; il ne peut aucunement s'y former de fentes qui n'ont lieu que lorsqu'il y a des parties qui portent et d'autres qui ne portent pas. On évite aussi les épanfrûres et les éclats qui se détachent sur les arrétes, en formant tout-à-l'entour un biseau de 3 à 4 quatre pouces de largeur, ce qui fait l'effet d'une espèce de frette qui ne porte rien et qui empêche la pierre de s'éclater.

106. Dans la construction ordinaire que l'on a suivie pour les piliers du Panthéon, on a fait le contraire, c'est le derrière que

Mauvais système de

démaigrir les pierres par derrière.

l'on a démaigri au lieu du devant, de sorte que les pierres ne portent complettement que près des arrêtes et sur la partie platte de 4 à 6 pouces de largeur que l'on a réservée; on a de plus posé chaque pierre sur quatre cales de bois dur qui ne sont pas susceptibles de se comprimer autant que le mortier, de sorte que des pierres qui ont ordinairement 3 pieds de long sur 2 pieds de large, ne portent réellement que sur quatre cales qui n'ont guère que la centième partie de la surface des pierres ; ainsi il n'est pas étonnant que des pierres qui portent sur une aussi petite superficie, se fendent et s'éclatent. Il est vrai que l'on a calé le derrière de ces pierres avec des éclats de pierre dure, mais ces éclats étant minces, cassent facilement, et sont de plus noyés dans une grande quantité de mortier qui tasse nécessairement ; et quand ces cales résistent, le milieu de la pierre qui ne porte que sur des mortiers, casse encore plus facilement.

On a voulu employer deux choses véritablem. inalliables.

107. L'on a voulu donner de la propreté aux paremens des murs du Panthéon, en ne faisant que de petits joints ; mais l'on n'a pas fait réflexion que l'on vouloit accorder deux choses *inalliables* : d'un côté, on mettoit beaucoup de mortier entre les pierres pour qu'elles ne s'éclatassent pas contre les arrêtes, et d'un autre, on en mettoit très-peu entre les arrêtes du devant, ce qui devoit nécessairement les faire éclater sur leurs paremens ; c'étoit cependant cette partie que l'on devoit garantir avec plus de soin que celle de l'intérieur.

Les éclats se sont faits en d'autres endroits que sur les piliers

108. Au reste, ce n'est pas seulement dans les piliers du dôme que les éclats se sont manifestés, il y en a dans beaucoup d'endroits au pourtour des murs. Ces éclats avoient même eu lieu bien avant que le dôme ne fût commencé, et ils devoient naturellement beaucoup s'accroître par une charge aussi extraordinaire que celle qu'ils portent, puisqu'elle est plus du double de celle que portent les pierres de la base des tours de Notre-Dame. Mais ce qui y a causé réellement le plus de dommage, c'est la quantité prodigieuse d'ouvriers armés de marteaux, qui travailloient aux

ragréémens et qui causoient dans tout l'édifice un ébranlement général ; ce sont les abbatis que l'on a fait des saillies des cadres et ornemens que l'on avoit préparés sur les piliers et panaches, et que l'on a supprimés comme peu propres à la nouvelle destination que l'on donnoit à cet édifice.

109. Ce qui a encore augmenté tous ces éclats et fentes, et sur-tout le tassement, c'est la quantité extraordinaire de pierres que l'on a cru devoir remplacer dans ces piliers, même par rapport aux fentes qui étoient presque perpendiculaires aux paremens, lesquelles diminuoient certainement moins la solidité qu'on ne lui faisoit de tort par les remplacemens. Il n'y avoit réellement à remplacer que celles qui s'éclatent sur le devant, et seulement par de simples placages qui ne doivent guère être plus épais que la partie qui a éclaté.

Le remplacement des pierres est une des principales causes du tassement

Il est probable que cette quantité de pierres remplacées qui est presque la moitié du total, a dû être la principale cause du tassement, ce qui paroît visiblement démontré, en ce que les piliers qui ont le plus tassé sont ceux sur lesquels on a le plus remplacé de pierres.

110. C'est par une raison à-peu-près pareille que les colonnes sont beaucoup plus dégradées à-présent que les piliers. L'on n'y a fait aucune réparation pendant les deux dernières années que l'on a réparé les piliers. Il en est résulté que ces piliers ayant pendant ce tems beaucoup tassé, et les colonnes tassant moins, elles ont porté une plus grande charge que celle qu'elles portoient auparavant, et cette charge a fait nécessairement crevasser les pierres qui n'étoient que fendues parallèlement aux paremens.

Raison pour laquelle les colonnes sont plus dégradées que les piliers.

111. Mais quand même cette raison n'auroit pas eu lieu, il est aisé de voir que quoique les colonnes, ainsi que les piliers, portent une partie du poids proportionnel à la surface des uns et des autres, ce poids fait beaucoup plus d'effet sur les plumées qui ont été observées tout autour des paremens, que sur le milieu des pierres. Il y a sur ce milieu une grande épaisseur de mortier qui

Les colonnes ont beaucoup plus de plumées relativement à leur surface, que les piliers.

ne fait que soulager un peu le poids, tandis que les plumées en portent réellement presque la totalité ; il en résulte donc que les colonnes ayant pour leur plumée presque la moitié de la surface de leur plan, tandis que celle des piliers n'en est au plus que le cinquième, la charge qui porte sur ces piliers est quatre fois plus soulagée par leur noyau, que celle qui porte sur le pourtour des colonnes n'est soulagée par le noyau de ces colonnes.

L'usage ordinaire de poser les pierres a induit Soufflot en erreur.

112. L'architecte Soufflot a sans doute été induit en erreur, relativement au démaigrissement des pierres et à la manière vicieuse de les poser sur cales avec de petits joints sur le devant, et de grands joints sur le derrière. Il a malheureusement suivi un usage qui étoit effectivement presque général, mais qui n'auroit jamais dû être employé au Panthéon, puisque l'on n'a peut-être jamais construit d'édifice où les points d'appui aient été destinés à porter un aussi grand poids que ceux-ci ; il falloit donc prendre pour exemple les ouvrages des anciens qui avoient grand soin de poser les pierres immédiatement les unes sur les autres sans intermédiaire de cales ni de mortier, qui ne portent la charge que sur quelques points des pierres, au lieu de la distribuer également sur toutes les parties de leur lit.

Poids que peuvent porter les pierres.

113. La surface du plan des piliers est de 109 pieds, et celle des trois colonnes, de 28 pieds, en tout 137 pieds.

Le pourtour des piliers sur 6 pouces de largeur pour les plumées, est de 21 pieds 6 pouces, et celui des trois colonnes de 12 pieds 6 pouces, ce qui fait en tout 34 pieds ; c'est-là à-peu-près la seule partie des piliers que l'on peut considérer comme portant la charge quand les joints ont été réduits au moindre volume possible, parce que ces joints qui n'ont que 2 lignes y parviennent quatre fois plutôt que ceux du noyau qui ont 8 lignes.

Il s'agit à présent de connoître le poids que portent les piliers, sur quoi il faut observer que la colonnade extérieure du dôme étant portée sur quatre grands arcs qui ont pour culées les murs de l'édifice, et sur quatre panaches construits entre ces arcs, les piliers

piliers ne portent aucune partie de cette colonnade, si ce n'est la moitié de la plate-forme et de son plafond qui s'appuie sur la tour du dôme; ils portent encore la moitié des voûtes et plate-formes des tribunes, et même la moitié des berceaux qui précèdent les arcs-doubleaux, parce que au moyen des lunettes dont ces voûtes sont percées, ils s'appuient sur ces piliers. On remarquera encore que l'on a construit dans la direction des murs de l'édifice quatre arcs-boutans qui ne soutiennent qu'une bien petite partie du dôme, parce qu'ils sont placés trop haut et immédiatement sous la plate-forme qui ne porte presque rien; on n'y aura donc pas d'égard.

La partie des assises sur laquelle porte la masse du dôme n'est pas suffisante.

114. On trouvera dans la table (136) le poids que portent les piliers au niveau des bases des colonnes, qui est 32,061,934 liv.; ainsi chaque pilier portera 8,015,483 liv.; et comme l'on a vu qu'il n'y a que 34 pieds quarrés qui portent bien efficacement la charge, il s'en suit que chaque pied quarré doit porter $\frac{8015483}{34}$ = 235,749 liv. Cette surface seroit néanmoins suffisante si chaque partie portoit dans tous ses points, puisque nous avons vu (66) que le pied quarré pouvoit porter au moins 500,000 liv. sans se fendre; mais outre que toutes les plumées n'ont pas 6 pouces de largeur, et qu'il ne faut pas compter les 2 pouces environ qui sont au pourtour, parce qu'ils sont sujets à s'éclater, il ne faut donc compter au plus que sur la moitié de cette surface; d'où il résulteroit que chaque pied quarré porteroit 471,498 liv., qui approche beaucoup de la moindre charge trouvée par l'expérience.

Si l'on considère ensuite que sur ces plumées il y a du mortier qui cède plus que les cales, on verra que ces cales sont presque les seules parties qui portent, et par conséquent qu'il n'est pas étonnant que les pierres de ces piliers se soient fendues et éclatées.

Prétendus porte-à-faux sur les entre-colonemens.

115. Les architectes qui ont été consultés, ont ajouté à ces causes de dégradations, une autre cause dont les inspecteurs-généraux ne conviennent pas. Les premiers disent qu'il existe un

porte-à-faux nuisible, en ce que de quatre arcs-doubleaux placés sur les colonnes, il n'y en a qu'environ les deux tiers qui portent sur les piliers, et que l'autre tiers porte à faux sur la partie qui reste vuide entre ces colonnes engagées.

Les seconds soutiennent qu'il n'y a pas là de porte-à-faux; que la partie des arcs qui ne s'appuie pas directement sur les piliers, porte directement sur les colonnes qui ont plus de largeur que ces arcs n'ont de hauteur, et que ces colonnes mêmes ne portent pas à beaucoup près toute cette partie d'arc qui au moyen de la poussée, agit contre le massif du pilier construit en saillie sur encorbellement au-dessus de l'architrave, et qui reporte par conséquent la plus grande partie du poids sur les faces droites.

Fig. 5. Cette partie au-dessus des encorbellemens doit être considérée comme une culée sur laquelle agit la direction FG de la poussée, et est contre-butée par la ligne d'entablement GN posée sur les sept colonnes de suite, et même par les murs des abouts de l'édifice, sur plus de 100 pieds de longueur, de sorte qu'il y a peu de butées mieux contre-butées que celle-ci.

Les encorbellemens sont effectivement assez ordinairement des porte-à-faux; mais ceux-ci sont appuyés à leurs extrémités contre les massifs en prolongation au-dessus des colonnes, et quoiqu'ils puissent être comparés à des voûtes, ils n'en ont pas les inconvéniens. Il est d'usage de former des arcs en décharge sur les architraves qui sont au-dessus des entre-colonnemens; mais ici ils auroient poussé au vuide la frise du côté de l'intérieur des arcs-doubleaux, ce qui eût été un véritable défaut. L'architecte a donc, avec grande raison, donné la préférence à des encorbellemens d'autant plus avantageux, qu'ils forment contre-poids avec les panaches qui sont aussi des encorbellemens, et qu'ils reportent le poids sur la masse même des piliers, au lieu de le reporter sur les colonnes qu'il étoit dans tous les cas important de décharger.

Tous les porte-à-faux ne sont pas vicieux.

116. Au reste il ne faut pas s'en laisser imposer par le mot de porte-à-faux, il s'en faut bien qu'ils soient tous vicieux. Les

architectes disent qu'ils ne connoissent que deux manières de soutenir solidement une construction ; la première, en la faisant porter de fond, et la seconde en l'établissant sur des arcs ou voûtes qui renvoient la charge sur les points d'appui par le moyen de l'appareil ; mais les encorbellemens en question renvoient aussi la charge sur les points d'appui, et ils portent aussi solidement une construction que des voûtes, lorsque la partie qui charge les encorbellemens par derrière est plus lourde que celle qui est sur le devant, et que les pierres ont chacune peu de saillie ; on les appellera si l'on veut des porte-à-faux, mais de tels porte-à-faux loin d'être vicieux, manifestent souvent le génie des constructeurs. Le quai de l'Horloge, le quai Pelletier, la chapelle de la Vierge de Saint-Sulpice, les trompes du ci-devant hôtel de Toulouse sont des porte-à-faux et ne sont certes pas des vices de construction, mais des modèles à suivre dans des cas difficiles qui se rencontrent assez souvent.

117. Le citoyen Rondelet appelle encore un porte à-faux une partie de la tour du dôme qui fait saillie sur les arcs-doubleaux. La surface de cette saillie est environ la trentième partie du plan de la tour, et sur 16 pieds de longueur fait au milieu une saillie de 10 pouces $\frac{1}{2}$ réduite à rien aux extrémités ; mais cette saillie est rachetée par quatre encorbellemens qui n'ont guère que 2 pouces $\frac{1}{2}$ de saillie chacun sur 20 pouces de hauteur, et qui ne risquent certainement pas de se casser. Cette partie est même portée en outre par une voûte annullaire et par une lunette dont les naissances s'appuient contre les arcs-doubleaux, et dirigent leur poussée contre le milieu même des piliers. Les porte-à-faux de la tour du dôme ne sont pas nuisibles.

Ainsi il n'y a donc aucun porte-à-faux ni vicieux, ni nuisible dans la construction du dôme du Panthéon, qui ait pu occasionner la moindre dégradation aux piliers dont il est question.

Au reste, il ne faut pas croire que le Panthéon soit le seul édifice où de pareilles dégradations soient arrivées. L'on sait assez combien il s'en est manifesté à l'église de Saint-Pierre de Rome,

et il est de fait que le feu citoyen Orrey, entrepreneur des bâtimens du ci-devant roi, avoit annoncé plusieurs fois à Soufflot qu'il devoit bien s'y attendre, qu'il avoit travaillé lui-même dans sa jeunese, à la restauration des piliers du dôme des Invalides, quelque tems après sa construction, et qu'on y avoit remplacé pour plus de 100 mille écus de pierres éclatées sous la charge.

118. La cause des dégradations des piliers du dôme du Panthéon françois étant bien connue, il n'est pas difficile de prévoir ce qui arriveroit encore si l'on n'y portoit remède.

Les deux piliers du fond ayant tassé de 20 lignes moyennement, de plus que ceux du devant, tandis qu'avant les réparations la différence du tassement n'avoit été que de 5 lignes, il est probable que si l'on remplaçoit dans les piliers du devant à-peu-près autant de pierres que dans ceux du derrière, ce tassement seroit à-peu-près égal sur les uns et sur les autres; on doit donc bien s'attendre que pendant qu'on remplacera la majeure partie des tambours des colonnes, le tassement augmentera encore, et il pourroit ne s'arrêter définitivement que lorsque les mortiers de l'intérieur auront été comprimés au point de pouvoir porter tout le poids, ce qui n'arriveroit peut-être que lorsque tous les paremens seront partis en éclats; mais alors on ne peut douter que la surface du noyau ne fut bien suffisante pour qu'il ne s'écrasât pas, puisqu'il contientplus de 100 pieds quarrés, et qu'il ne faut pas plus de 16 pieds pour porter le poids; comme l'on ne veut certainement pas laisser partir en éclats tous les paremens, et que l'on cherche les moyens d'empêcher la continuation de ce tassement, qui peut-être n'est pas près de son terme, il est bon d'examiner d'après des expériences certaines, quel est véritablement le terme où il doit s'arrêter naturellement.

Expérience sur la compression du mortier.

119. L'on a pour cet effet essayé de comprimer dans une boite de fer un morceau de mortier que l'on a pris dans une partie construite en même tems que ces piliers, et quoique cette expérience soit délicate et mérite d'être répétée, il a paru néanmoins

qu'il se comprimoit des $\frac{3}{10}$ de son épaisseur par une charge équivalente à celle qu'exerce le dôme sur les assises des piliers. Il y a 45 joints dans la hauteur des colonnes et de l'entablement, sur 45 pieds de hauteur; d'après les rapports des ouvriers et les arrachemens faits aux piliers, on peut compter que les joints au-delà des plumées ont moyennement 8 lignes d'épaisseur. Ainsi les 45 joints forment 30 pouces dont les $\frac{3}{10}$ sont de 9 pouces; on peut donc compter que les piliers ne peuvent pas tasser au-delà de 9 pouces en tout dans la hauteur des colonnes et de l'entablement.

120. L'on a vu par les nivellemens, que le plus fort tassement qui se trouve au second pilier est parvenu à 5 pouces $\frac{1}{2}$, ainsi ce pilier ne peut donc plus tasser que de 3 pouces $\frac{1}{2}$, et le premier pilier qui n'a tassé que de 3 pouces $\frac{1}{2}$ ligne peut encore tasser de 5 pouces 10 lignes. Le tassement au-dessus de l'entablement, et jusqu'à 15 à 16 pieds au-dessus de cet entablement où la surface portante n'est guère plus grande que sur l'entablement même, et où il y a 10 joints, peut encore tasser de 2 pouces, et supposant que la partie du panache sur la même hauteur, mais qui a plus de surface, ne tasse que de moitié ou d'un pouce, il en résultera que les arcs et les panaches pourroient descendre de 12 pouces au-dessous des voûtes des nefs, et c'est certainement là le maximum de l'effet du tassement, car alors les pierres portant complettement sur toute la surface de leurs lits, sans même y comprendre les plumées, en supposant qu'elles fussent éclatées en entier, elles auroient beaucoup plus de surface portante qu'il ne seroit nécessaire pour porter le dôme en entier.

Le maximum du tassement des piliers peut être de 9 pouces.

121. J'ai supposé que la largeur moyenne des joints étoit équivalente à une largeur uniforme de 8 lignes, mais c'est ce qui n'est pas très-exact; un quart de ces joints n'a que 4 à 5 lignes, un autre quart 6 à 7, et l'autre moitié de 8 à 18 lignes, le quart de ces joints ne peut tasser que d'une ligne et demie; un autre quart de 2 lignes, et l'autre moitié de 4 lignes, tandis que nous avons

supposé qu'il tasseroit de 2 lignes $\frac{4}{10}$, et comme la moitié de la surface est plus que suffisante pour tout porter, il y a apparence que le tassement moyen sera moindre de 2 lignes $\frac{4}{10}$ sur chaque joint, et que le dôme ne descendroit pas de 12 pouces, et peut-être ne parviendroit pas même jusqu'à 9 pouces.

Il étoit nécessaire de constater s'il n'y avoit pas de vuide dans les piliers.

122. Il étoit important de constater si, comme on l'assuroit, le mortier ayant diminué d'épaisseur par le dessèchement, et les pierres ne portant que sur les cales, il restoit des vuides entre les lits du dessous des pierres et le lit de mortier qui étoit entre elles; car alors il auroit fallu ajouter la somme de tous ces vuides à celle de la diminution de volume du mortier par la charge qu'il supporte; mais les sondes ayant démontré que dans 40 joints il n'y en avoit pas un seul où le mortier ne touchât exactement tous les lits, il est bien certain que le mortier n'a pas diminué au-delà du tassement des cales; il est même problématique que le mortier diminue par la dessication, puisqu'il y a des cas même où il augmente considérablement; si dans les 40 joints découverts par les sondes, on en eût trouvé un seul de vuide, on auroit pu dire qu'il étoit probable qu'il y eût eu $\frac{1}{40}$ de joints vuides; mais comme on n'en a trouvé aucun, la probabilité peut donc s'exprimer par $\frac{0}{40} = 0$; ainsi en parlant mathématiquement, on peut dire qu'il n'y a aucun vuide et par conséquent que le tassement ne peut pas excéder les 9 pouces auxquels nous l'avons fixé.

Quand même tout le pourtour des piliers seroit éclaté, le reste est plus que suffisant pour porter la charge.

123. On peut donc être assuré que lorsque le tassement aura cessé tout-à-fait, ce qui peut néanmoins être encore éloigné, la surface des piliers seroit assez grande pour porter le dôme, en supposant même que tout leur pourtour sur les plumées fût éclaté, puisqu'il resteroit encore plus de 100 pieds de superficie, s'appuyant complettement pour porter la charge, tandis que 16 à 18 pouces pourroient suffire s'ils n'étoient pas proche des paremens, et qu'ils portassent sur un mortier condensé à la consistance de la pierre, comme seroit celui-ci, qui seroit alors réduit

aux $\frac{7}{8}$ de l'épaisseur qu'il avoit, mais il n'en résulteroit pas moins que si l'on n'a rien à risquer pour l'écrasement du dôme, et même pour sa durée, les voûtes des tribunes ne puissent baisser beaucoup plus que celles de la nef, et que les corniches des piliers, ainsi que les tablettes d'appui ne baissassent de 8 à 9 pouces de plus que celles des colonnes isolées qui en sont les plus proches.

124. On ne pourroit alors raccorder les voûtes que par des arcs rampans très-sensibles et désagréables à la vue; les corniches seroient encore plus difficiles à corriger: il n'y a cependant pas apparence que le dôme descendît beaucoup plus qu'il n'est descendu jusqu'à présent si on n'y touchoit pas, car depuis plus d'un an où l'on a pris des moyens pour connoître si le tassement continueroit, on n'a pas remarqué qu'il fût sensible, ni qu'il se soit fait de nouvelles fentes, ni que celles qui existoient se soient ouvertes davantage, si ce n'est dans les parties des colonnes qui ont crevassé, et qui, dès qu'elles avoient commencé à s'ouvrir, auroient continué à le faire quand même elles n'auroient pas été chargées.

Mais il en résulteroit de grandes irrégularités qu'il faut prévenir

125. Mais comme on a l'expérience que les coups de marteau que l'on est obligé de donner pour les incrustemens et les réparations, occasionnent un mouvement très-sensible, parce que le mouvement fait changer la force morte occasionnée par le poids du dôme, en force vive, ce qui, comme on le sait, lui donne une action infiniment plus considérable que celle de la première qui lui est à peine comparable, et que l'on sera cependant obligé de continuer ces réparations et même d'en faire de très-considérables aux colonnes qu'il faut refaire à neuf en grande partie, il n'est pas douteux que si l'on ne prend pas des précautions extraordinaires pendant ce tems, les dégradations augmenteront surtout sur les piliers qui se sont le moins affaissés et même sur les autres où il s'en faut de beaucoup que tous les paremens aient éclaté, ce que l'on peut cependant attendre naturellement, puis-

Les coups de marteau font changer la force morte en force vive.

qu'il n'y a pas de raison pour que la même cause toujours subsistante ne produise pas les mêmes effets, d'autant plus que malgré toutes les pierres que l'on a changées, on n'a pas augmenté de beaucoup la surface portante.

Ces effets sont même d'autant plus à craindre, que la restauration des colonnes est beaucoup plus dangereuse que les incrustemens que l'on a faits dans les piliers, parce qu'ici on ne changeoit les pierres voisines que les unes après les autres, et même que celles qui étoient un peu grandes n'étoient changées que par partie; que ces changemens se faisoient sans étaiemens et presque sans étrésillonnemens, au lieu qu'il faudra peut-être replacer des tambours entiers de colonnes, et même en conservant leur noyau lorsqu'on le pourra; il faudra des étaiemens et des chevalemens solides, et d'autant plus dangereux qu'ils seront à une plus grande hauteur.

Si on ne cherchoit pas à détruire la cause, les mêmes effets se perpétueroient.

126. Toutes ces opérations et l'arrachement des pierres ne peuvent pas se faire sans une multiplicité de coups redoublés qui occasionneront peut-être plus de dégradations qu'il n'en est encore arrivé, de sorte qu'il seroit très à craindre que ces réparations ne servissent à aggraver le mal et à faire éclater toutes les nouvelles pierres qui ont été remplacées, lesquelles, ainsi que les anciennes, portent principalement près des paremens, ayant été calées avec des ardoises qui ne tassent point.

En continuant, suivant le même systéme, les réparations, il pourroit donc se faire que l'on fût obligé d'y travailler pendant un très-long-tems, puisque pendant que l'on feroit d'un côté des réparations, celles qui viendroient d'être faites pourroient se dégrader de même, ce qui est effectivement arrivé à plusieurs pierres que l'on a remplacées, puisque ne détruisant nullement la cause, les mêmes effets devoient toujours se continuer.

127. Tout le monde doit donc convenir qu'il y auroit de l'imprudence

prudence à ne faire que réparer les dégradations qui sont survenues aux piliers, sans chercher les moyens d'arrêter la cause qui les a produites et qui peut encore les produire, et les reproduire même sur les parties que l'on réparera; il pouvoit donc arriver que les tassemens devinssent si considérables que les voûtes des tribunes se séparassent totalement, que les corniches de ces tribunes devinssent si mutilées qu'elles fussent très-difformes, que les architraves même se séparassent, les tirans qui retiennent les clavaux n'ayant qu'une force déterminée qui pouvoit cesser d'être suffisante.

Il ne faut donc pas se contenter de réparer seulement les dégradations.

128. Tous ces effets qui ne sont pas au reste sans remède, peuvent être prévenus et doivent l'être, mais c'est là seulement où doivent se borner toutes les dégradations à prévoir; car puisque le dôme est descendu presqu'uniformément, qu'il n'y a pas encore une seule fente dans son tambour, et qu'il n'y a pas apparence qu'il s'en forme à-present, et par conséquent qu'il risque de s'écrouler, même dans une longue suite d'années, on ne peut donc pas dire qu'il y ait un péril imminent.

Il n'y a cependant aucun péril imminent.

129. Le dôme de Saint-Pierre de Rome a eu plus de 500 crevasses qui se sont formées dans l'espace d'un siècle avant qu'on ne les réparât, et elles étoient bien plus dangereuses qu'elles ne le seroient ici, car il paroît bien démontré que le mal provenoit de la foiblesse des contreforts; et comme on n'a pas remédié à cette cause, il s'ensuit qu'elle pourroit bien encore reproduire le même effet, comme je le dirai dans la suite, au lieu que quand même on ne remédieroit pas à la cause qui a fait descendre le dôme du Panthéon, il n'en résulteroit qu'une descente un peu plus grande, mais sans aucun échec pour lui-même; ce sont les seules parties accessoires, les plates-bandes, les voûtes voisines qui risquent de se désunir; ce sont les pierres de paremens des piliers et les colonnes engagées qui risquent de se fendre, et si l'on n'y remédioit pas, elles pourroient offrir bientôt l'image d'une

Il y a eu beaucoup plus de dégradations au dôme de St.-Pierre de Rome qu'à celui-ci.

ruine antique ; mais ces piliers n'en subsisteroient pas moins ; et leur noyau, quand même les paremens seroient tombés et éclatés, seroit encore plus que suffisant pour durer des siècles en portant le dôme ; mais les dégradations désagréables à l'œil, qui en résultent, sont des motifs bien suffisans pour ne rien épargner, afin qu'elles ne puissent pas se perpétuer.

CHAPITRE III.

Discussion des différens projets proposés pour consolider le dôme du Panthéon.

---

130. PUISQU'IL est reconnu que le vice de construction des piliers du dôme du Panthéon provient uniquement de ce que leur pourtour seul, sur 5 à 6 pouces de largeur, porte presque tout le poids, dès que l'on n'augmentera pas convenablement cette surface portante, on ne remédiera à rien du tout, et les incrustations que l'on a faites jusqu'ici, quoique calées assez exactement en ardoises qui ne tassent pas, n'occupant pas une étendue beaucoup plus grande que la première construction, ne peuvent pas avoir donné une grande augmentation de solidité; la majeure partie de ces remplacemens portant sur les arrêtes est même plus nuisible qu'utile.

La cause bien connue, il faut chercher le remède.

131. Il n'est pas facile sans doute de porter des secours dans le centre des piliers, car il n'est guère proposable de faire des arrachemens de la moitié du nombre des pierres sur une grande profondeur d'un pied et demi à deux pieds, et de faire porter les nouvelles pierres immédiatement l'une sur l'autre et sur les anciennes sans vuide, en les calant exactement dans toutes leurs parties, le danger que l'on courroit seroit trop grand, et il seroit bien difficile de le prévenir.

Il n'est pas proposable de changer la moitié des pierres.

132. Il n'est donc pas douteux qu'il ne faille chercher à augmenter la surface portante, et c'est sur cet objet que se sont portées toutes les vues de la plupart des artistes qui ont donné des moyens de venir au secours de cet édifice.

Il faut donc chercher à augmenter la surface portante.

133. Les architectes nommés par le Ministre ont proposé des

Moyens proposés par les architectes.

revêtemens de deux pieds et demi d'épaisseur, construits contre les faces latérales des piliers, et qui comprendroient les trois colonnes engagées dans ces piliers, lesquelles seroient par là supprimées. Ils seroient construits en pierre dure comme les arcs-boutans proposés par les ingénieurs, sans démaigrissement et sans mortier.

Il est certain que plus on ajoutera de surface aux piliers et plus on allégera sur chaque partie la charge qu'ils portent, pourvu qu'on lie efficacement cette nouvelle maçonnerie à l'ancienne; car si on n'y faisoit pas de forts incrustemens, le poids continueroit toujours de se porter sur le massif des piliers. On observera d'abord que ces nouveaux murs ne soulageroient en rien la partie du pan coupé, qui est cependant celle qui est la plus chargée, ainsi qu'on va le démontrer.

Calcul du poids de toutes les parties du dôme.

134. L'on a calculé exactement le cube du dôme et des piliers ainsi que celui de toutes les parties qui portent sur ces piliers, sans y comprendre la colonnade extérieure qui porte sur les quatre grands arcs auxquels les murs de long-pan de l'édifice servent de culée; l'on a aussi calculé le poids de ces différentes parties, eu égard au poids du pied cube des différentes pierres, en distinguant les parties qui doivent être portées par les arcs-boutans de celles qui sont au-dessous, et même de celles qui sont portées depuis le dessous de l'entablement jusqu'à l'imposte où les piliers ont moins de surface qu'au-dessus, ainsi que la partie depuis l'imposte jusqu'au socle, parce que c'est à cet endroit que seront faits les plus grands effets. Le résultat de ces calculs a donné la table suivante, d'après laquelle on en a formé une seconde où l'on a distingué les parties portées par les panaches, que l'on a trouvé de 9,569,363 liv.; celles qui sont portées par les piliers au-dessus des arcs-boutans, qui sont de 6,974,358 liv.; en tout, 16,543,721 liv., qui est la charge réelle qui peut être portée par les arcs-boutans; la partie du pilier au-dessous de ces arcs-boutans est de 6,807,075 liv., et la partie portée par les arcs-doubleaux qui est de 8,711,083 liv.

Cette dernière partie étant aussi portée par les arcs-boutans ; de sorte que la totalité du poids du dôme des piliers, et des parties des voûtes de la nef et des tribunes qui portent sur la fondation de ces piliers, est de 32,061,934 liv.

Le calcul se rapporte à très-peu près à celui qu'a fait le citoyen Rondelet.

TOISÉ DU DOME DU PANTHÉON FRANÇOIS.

DÉNOMINATION DES PARTIES.	Nombre	Cube particl.	Cube total.	Poids.
La calotte.		pi. 462.00		
Le plafond sous la calotte.		259.60	pi. 2914.01 × 148	liv. 431.273.48
Le tambour supérieur.		1320.00		
La corniche et le socle.		577.50		
Les piliers sous le couronnement.	8	294.91		
La couverture en plomb.	*	138.82	158.82 × 792	109.945.43
La voûte extérieure.		11412.00	1.1412.00 × 125	1.426.500.00
La voûte du milieu, partie supérieure.		3648.75	7437.15 × 125	929.643.00
Les quatre parties pleines de la voûte du milieu. . .	4	3788.40		
Le couronnement de la voûte inférieure.		533.60	8956.49 × 125	1.119.561.25
La voûte inférieure.		8422.89		
La galerie et corniche de l'attique.		4581.50		
Les trumeaux de l'attique. . . . . . . , . . .	16	5250.96	17.013.40 × 148	2.517.983.20
L'attique en trois parties jusqu'à la corniche du dôme. .		6880.94		
Les trumeaux sous la galerie.	16	900.00		
Le plafond sous la voûte du milieu.		2412.68	5349.98 × 148	799.123.04
Les trumeaux dans la galerie intérieure.		2956.80		
L'entablement de l'ordre intérieur.		9286.80		
A ôter les vuides.	16	1890.00		
Reste pour l'entablement.		7396.80	7396.80 × 156	1.153.900.80
Le tambour du dôme derrière les colonnes.		22403.70		
A ôter les fenêtres.	16	11016.00		
Reste pour le tambour.		11387.70	11.387.70 × 156	1.776.481.20
Les colonnes.	16	3734.28	5059.08 × 156	789.216.48
Le socle des colonnes. . . . . . , ...	16	1324.80		

TOISÉ DU DOME DU PANTHÉON FRANÇOIS.

DÉNOMINATION DES PARTIES.	Nombre	Cube partiel.	Cube total..	Poids.
		pi.	pi.	liv.
Le stilobate depuis le socle aux panaches.		30.849.00	33.387.82 × 156	5.208.499.92
La corniche du dôme.		1978.82		
Les encorbellemens derrière le dôme.		560.00		
Les quatre escaliers à vis.	4	17.180.80	17.679.00 × 148	2.616.492.72
Les marches et le noyau.	416	499.20		
Les deux timpans du dessus, joints à l'arc.	4	1865.39	4164.69 × 156	649.691.64
L'arc-doubleau inférieur, séparé du pilier.	4	702.71		
L'arc supérieur séparé du pilier.	4	1596.59		
La partie de l'arc supérieur, jointe au pilier. . . .	4	524.23	1.924.62 × 156	300.240.72
Les deux timpans de côté, joints au pilier.	4	1005.11		
La partie de l'arc inférieur, jointe au pilier. . . .	4	395.28		
Les piliers, depuis l'escalier jusqu'à l'entablement. . .	4	3685.50	21.937.50 × 156	3.422.250.00
Idem, sur la hauteur de l'entablement.	4	8424.00		
Id., de l'entablement au centre de gravité des arcs-bout.	4	9828.00		
Partie entre l'entablement et le pan coupé.	4	960.00	2.933.32 × 156	457.597.92
Les panaches portés.	4	1973.32		
Les panaches au-dessous du centre de gravité. . . .	4	95.20		
Les piliers, du centre de gravité aux chapiteaux. .	4	16.860.00	18.928.52 × 156	2.952.849.12
La corniche du pilier.	4	612.00		
Les plafonds dessus et dessous la colonnade.		7468.06	7.831.06 × 156	1.221.645.36
Les architraves de la colonnade.	16	363.00		
Les voûtes des tribunes.	8	144.00	2.082.00 × 156	324.792.00
Les voûtes des nefs.	4	938.33		
Les entablemens des tribunes.	4	1485.80	12.032.32 × 156	1.877.041.92
Les piliers, de l'entablement à l'imposte.	4	8384.00		
Les architraves des entre-colonnemens.	8	520.00		
Les architraves des angles.	4	396.00		
Les plafonds des tribunes.	8	1246.52		
Les piliers, de l'imposte au socle.	4	12.056.00	12.056.00 × 164	1.977.184.00

Le pied cube de pierre pèse moyennement 152 liv. TOTAL. . . . . 201.797 p. c. 32.0619341.

RÉCAPITULATION DU POIDS.

				liv.
La couverture en plomb.	138.82	× 792	=	109.945.44
La pierre des piliers depuis l'imposte. .	12.056.00	× 164	=	1.977.184.00
Celle des piliers et tambour jusqu'à l'attique.	129.065.18	× 156	=	20.134.168.08
Celle de l'attique et parties joignantes. .	43.006.29	× 148	=	6.364.930.92
Celles des voûtes.	27.805.84	× 125	=	3.475.730.00
Total de la pierre et du plomb. .	201.662.31			31.961.958.44

POIDS DES DIFFERENTES PARTIES DU DOME,

Pour trouver la charge sur les arcs et sur les piliers, et les centres de gravité de ces différentes parties.

DÉNOMINATION DES PARTIES.	1ere.	2e. POIDS des différentes parties du DOME.	3e. POIDS porté par les ARCS.	4e. POIDS porté par les PILIERS.	5e. Distances des centres de gravité au parement intérieur.
La voûte inférieure.	A.	1,119,551	559,780	559,780	0.75
Les colonnes intérieures.	B.	789,216	394,608	394,608	1.31
Le couronnement.	C.	431,273		431,273	2.19
La voûte du milieu.	D.	929,643		929,643	2.19
Le stilobate.	D 2	5,208,500	2,604,250	2,604,250	2.19
L'entablement de l'ordre.	E.	1,153.901	576,950	576,950	3.31
Les trumeaux sous l'attique et plafond. . .	F 2	799,123	399,561	399,561	3.31
La couverture en plomb.	G 2	109,945	54,978	54,978	3.31
La voûte extérieure.	G.	1,426,560	713,250	713,250	3.31
Le tambour du dôme.	H.	1,776,481	888,240	888,240	4.29
Le dessous de l'arc tenant aux piliers. . .	I.	300,240		300,240	4.85
Partie des panaches, portée.	I 2	457,598		457,598	4.85
L'attique.	J.	2,517,983	1 258,992	1,258,992	5.25
				9,569,363	
Les quatre escaliers en vis.		2,616,493		2,616,493	9.85
Les plafonds de la colonnade.		1,221,645	610,823	610,823	18.85
La partie du pilier portée par l'arc-bout. .		3,422,250		3,422,250	11.50
La voûte des tribunes et des nefs. . . .		324,792		324,792	13.85
				6,974,358	
Le dessous des arcs-doubleaux.		649,651	649,651		
La partie des piliers non portée. . . .		2,952,849		2,952,849	
Partie des piliers de là à l'imposte. . .		1,877,042		1,877,042	
Partie des piliers de l'imposte aux socles .		1,977,184		1,977,184	
				6,807,075	
TOTAUX.	. . .	32,061,934	8,711,083	23,350,851	
Le quart du poids total.	. . .	8,015,483			

Recherche du centre de gravité commun de toutes les parties qui portent sur les piliers.

137. L'on a ensuite cherché d'après ces tables, le profil et les plans, les centres de gravité du plan de toutes les parties du dôme qui s'appuient sur les panaches et sur les piliers, en supposant qu'il se fasse une rupture dans le milieu R des fenêtres qui sont entre le dessus, les piliers et le milieu des arcs-doubleaux, de sorte que la moitié des voutes extérieures et intérieures du dôme, les moitiés du tambour et des entablemens intérieurs portent sur les arcs et l'autre moitié porte sur les panaches ; mais la voûte du milieu ainsi que le couronnement qui porte dessus, les escaliers en vis, les panaches et les piliers jusqu'au centre de gravité des arcs-boutans projettés, portent en entier sur ces piliers et sur les arcs-boutans.

138. On a marqué dans la cinquième colonne de la seconde table la distance du nud du dôme pris sur la frise de l'ordre aux points où répondent les centres de gravité du plan de ses différentes parties, ces points sont au nombre de onze, parce que plusieurs centres de gravité tombent à-peu-près sur les mêmes points. On les a réduits d'abord à six, ensuite ces six sont réduits à trois, et les deux premiers à un seul, qui marque la distance du centre de gravité commun des parties qui portent sur les panaches, lesquelles pèsent 9,569363 liv., ce centre de gravité se trouve à 3 pieds $\frac{2}{100}$ du nud du dôme, et comme ce nud se trouve à 7, $\frac{55}{100}$ du nud de la frise du pan coupé. Ce centre de gravité des parties en saillie est à 4 pieds $\frac{46}{100}$ du pan coupé, la quatrième colonne marque la distance du centre de gravité des parties qui portent immédiatement sur le pilier, lesquelles pèsent 6,974,358 liv. que l'on trouve à 10 pied $\frac{47}{100}$ du nud du dôme, et à 1,047 — 755 = 2 pieds $\frac{92}{100}$ en dedans du pilier au-delà du pan coupé. En réunissant ensuite ces deux poids dans un seul qui est 16,559,164 liv., on trouve que la distance du centre commun de toute la charge qui est sur ce pilier est à 6 pieds $\frac{2}{100}$ du nud du dôme et à 1 $\frac{34}{100}$ en dehors du pan coupé, ce qui

fait

fait voir que dans cette hypothèse toute la charge seroit en porte-à-faux de 1 pied $\frac{1}{2}$ au dehors des piliers.

Mais si l'on considère que les parties portées par les arcs, portent aussi sur les piliers tant que le dôme n'est pas fendu en 8 parties et que, eu égard à la poussée, on peut considérer tout ce poids réuni dans le pilier vis-à-vis de la colonne d'angle au point O fig. 19, le poids total porté par les arcs, est de 8,711,083, ce qui fait pour la moitié de chaque arc 1,088,885, ce poids agit suivant la direction de la poussée de chaque côté du pilier suivant une force égale à $\frac{1088885}{5} \times 7 = 1,524,029$, et produit son action au point O comme s'il étoit poussé par une diagonale dans le sens du centre du dôme à la colonne d'angle avec une force égale à $\frac{1524029}{5} \times 7 = 2,133,640$, laquelle force seroit encore inclinée de 45 degrés; mais cette force se divise en deux autres, l'une horizontale et l'autre verticale, qui toutes deux sont égales à $\frac{2133640}{7} \times 5 = 1,524,029$ comme ci-dessus; c'est la charge qui résulte sur le pilier au point O, provenant du poids que portent les arcs. La poussée horizontale est retenue par le grand poids du dôme sur les piliers, et comme il y en a quatre, cette charge est 6,096,116.

Deuxième hypothèse, préférable à la première.

140. Cherchant ensuite le centre de gravité commun entre ce poids et 16,559,164, on trouve qu'il est éloigné du pan coupé du côté du centre du pilier, d'un pied $\frac{44}{100}$, d'où il résulte du système total des poids réunis sur les piliers, que la charge majeure se trouve à 1 pied $\frac{1}{2}$ en dedans du pilier, et qu'il n'y a par conséquent pas de porte-à-faux. Ce point d'appui se trouve effectivement de 2 pieds $\frac{80}{100}$ en avant du véritable centre de gravité du plan du pilier où il devroit aboutir, ce centre de gravité du pilier étant à 4 pieds $\frac{33}{100}$ du pan coupé, ce qui fait toujours voir que c'est en avant du pan coupé qu'il convient de mettre l'appui direct si on l'emploie, et non pas en arrière.

141. Si dans le plan d'un pilier on tire les lignes PM et MO, elles diviseront ce plan en trois parties : la partie PQM = 27 pieds $\frac{1}{2}$, et la partie PMOS = 60 pieds $\frac{1}{3}$. On sait que

Partie du poids porté par le pan coupé d'une

part, et par les côtés des piliers de l'autre.

chacune de ces parties porte 1°. une portion du poids direct qu'elle soutient, et que ce poids est proportionnel aux surfaces; 2°. que le pan coupé porte en outre tout ce que porte le panache et la moitié de ce que portent les arcs. Les côtés du pilier portent de plus la moitié des voûtes et plafonds des tribunes, la partie des voûtes de la nef qui s'appuient sur les panaches des tribunes, et l'autre moitié de ce que portent les arcs.

La surface de la partie portante du pan coupé est de 55 pieds ; et celle des deux côtés du pilier est de 120 pieds $\frac{2}{3}$. La totalité du poids qui porte directement sur les piliers est (136) 2,616,493 liv. + 3,422,250 = 6,038,743 liv.

L'on trouvera aisément que ce pan coupé porte 1,897,890 liv. de ce poids, et que les deux côtés en porteront 4,140,853 liv. Il faudra ajouter au premier tout ce que porte le panache qui est 9,569,363, plus la moitié de ce que portent les arcs; de sorte que ce pan coupé portera 1,897,890 + 958,963 $\frac{8711083}{2}$ = 15,822,796, ce qui fera par chaque pied quarré $\frac{15822794}{65}$ = 287,687. Le poids qui portera sur les côtés des piliers sera 4,140,852 + $\frac{8711033}{2}$ + 610,823 + 324,792 = 9,432,008, ce qui donnera par chaque pied quarré $\frac{9432008}{120}$ = 78,600. Ainsi le rapport de la charge sur le pan coupé est à celle sur les côtés du pilier : : 287 : 77 : : 100 27 $\frac{2}{3}$; d'où il suit que les pierres qui forment le pan coupé sont à-peu-près quatre fois plus chargées que celles qui forment les côtés des piliers ; par conséquent ce n'est donc point auprès de ces côtés du pilier qu'il faut placer des points d'appui directs si on veut les employer, mais vers le pan coupé.

Les assises de la colonne d'angle sont les plus chargées.

142. Cependant, comme la poussée des arcs-doubleaux s'exerce sur les côtés des piliers, et que celle des deux voûtes qui portent sur le même pilier se réunit sur la colonne de derrière de ces piliers, ce sont les pierres de cette colonne qui sont réellement le plus chargées. L'on voit, fig. 5, que la direction F G de cette poussée se divise en deux efforts au point G, l'un qui agit

horizontalement suivant la ligne GN, et l'autre qui agit verticalement suivant la ligne GH, et ces efforts sont l'un et l'autre à la moitié du poids qui charge ces arcs-doubleaux, comme le côté d'un quarré est à sa diagonale.

143. La charge sur ces arcs étant 8,711,114 liv., la partie qui en résultera sur les colonnes et les pilastres auxquels elles sont jointes sera $\frac{8711083}{5} \times 7 = 12{,}195{,}512$ liv. ; et comme les colonnes portent $\frac{36}{67}$ de ce poids, parce que le diamètre supérieur de ces mêmes colonnes est dans cette même proportion avec la largeur des arcs-doubleaux, cette charge sera $\frac{12195512}{67} \times 36 =$ 6,552,838 liv., à quoi il faut ajouter le poids direct qui est d'environ 330,000 liv. depuis les chapiteaux à la plate-forme du dôme, ce qui fait en tout 6,882,838 ; mais comme les plumées qui portent seules n'ont que 16 pieds quarrés de surface pour les quatre colonnes, il s'en suit que chaque pied quarré porte $\frac{6882838}{16} =$ 430,177, ce qui est presque tout ce que cette pierre peut porter (66). On ne doit donc pas être étonné si ces colonnes étant aussi chargées ont plus périclité que les autres.

144. L'on vient de voir (141) que les pierres des pans coupés portent près du quadruple de celles qui sont entre les colonnes engagées dans les côtés des piliers : or il est certain que la manière de soutenir un poids en renforçant les parties les moins chargées sans consolider celles qui le sont le plus, est nécessairement vicieuse.

C'est un vice de placer les renforcemens sous les parties les moins chargées.

Si l'on avoit à soutenir un triangle dont deux des côtés fussent chargés chacun d'un million et l'autre de quatre millions, seroit-il naturel de ne mettre qu'un soutien sous les quatre millions, et d'en mettre au moins cinq à six sous le poids d'un million, qui n'en est que le quart? C'est cependant ce qui arriveroit ici, car un mur de deux pieds trois pouces d'épaisseur, dont les pierres sont posées sans aucun intermédiaire de mortier et ne peuvent point tasser, joint à un mur de trois pieds d'épaisseur avec des joints, est capable de cinq à six fois au moins plus de résistance qu'un

parement de mur de six pouces d'épaisseur qui peut tasser, de sorte que l'on oppose à une masse quadruple une résistance au moins de six fois plus foible.

Si l'on ne consolide les piliers que dans la hauteur des colonnes, les dégradations se feront dans les parties supérieures.

145. Mais une observation très-importante à faire contre cette construction de murs ajoutés aux deux côtés des piliers, c'est qu'en supposant que l'on eût parfaitement consolidé les piliers, même dans les entre-colonnemens et pans coupés, et que cette nouvelle maçonnerie ne pût aucunement tasser, il arriveroit nécessairement que les dégradations se feroient alors sur l'entablement, et même dans les tribunes et vers le bas des panaches, puisque la charge sur l'entablement est très-peu différente de celle qui a lieu vers le haut des colonnes où les fentes se sont manifestées comme ailleurs. La différence des hauteurs des astragales et du milieu de l'entablement n'étant que de 7 pieds, la charge qui à cette hauteur n'est que de $\frac{1}{14}$ moindre que sur les astragales, est trop peu différente de ce qu'elle est sur ces astragales pour que l'effet ne fut pas à peu près le même, et qu'il ne s'étendit pas même bien plus haut puisque dans ce projet on ne prend aucune précaution pour en empêcher.

Il n'y a pas plus de surface portante au niveau de l'entablement qu'au-dessous.

146. On a objecté que les pierres des piliers risquoient beaucoup moins de s'écraser au niveau de l'entablement et au-dessus, qu'au-dessous, parce que la superficie du pilier qui étoit déja augmentée de 45 pieds, à cette hauteur augmente encore à chaque assise, à cause des pendentifs, jusqu'à devenir quatre fois plus considérable. Mais on a répondu que si la superficie du plan du pilier au niveau de l'entablement étoit augmentée de 45 pieds, la superficie de la partie portante n'étoit nullement augmentée, parce que cette superficie de la partie portante n'est que sur les plumées à cause du démaigrissement, et comme elle est au plus de 6 pouces de largeur tout au pourtour, on trouve qu'elle n'est même que de 31 pieds $\frac{1}{2}$ sur l'entablement, tandis qu'elle est de 33 pieds prise vers le dessus des colonnes, parce que ces colonnes ont plus de développement que l'entablement; et sur plus de

24 pieds de hauteur au-dessus des chapiteaux cette superficie n'augmente pas sensiblement.

147. L'on doit remarquer que tant qu'une partie inférieure d'un mur cède, la partie supérieure descend sans éprouver de dégradations ; mais lorsque cette partie inférieure a cessé de se comprimer, la partie qui est au-dessus se comprime à son tour, et continue successivement sur une partie de cette hauteur jusqu'à ce que le poids devienne en équilibre avec les résistances dont la pierre est capable pour n'être plus écrasée ni fendue. Il est donc bien certain que quelqu'ouvrage que l'on fasse dans le bas des piliers, on n'empêchera pas l'effet de se continuer plus haut, et qu'en réparant la totalité des piliers sous l'entablement seulement, on n'empêcheroit pas les dégradations dans les tribunes, sur les panaches et même sur les arcs-doubleaux, ce qui est infiniment dangereux et attaqueroit pour lors très-fortement la solidité du dôme, et ce seroit dans ce cas que l'on pourroit craindre avec juste raison pour la durée de ce monument.

Tant que la partie inférieure cède la partie supérieure n'éprouvera aucune dégradation.

148. D'autre part, si l'on considère qu'en proposant, comme on le fait, de masquer d'une grosse masse lisse la partie de l'édifice qui doit être le plus décorée, en laissant subsister le reste, on ôte absolument toute convenance, toute simétrie, et sur-tout le parfait accord qui règne entre toutes les parties de cette grande et savante composition. On conviendra qu'il seroit difficile de défigurer davantage un édifice qui passe à juste titre pour l'ouvrage le plus parfait peut-être que nous ayons à présent dans ce genre.

Les murs que l'on propose d'ajouter gâteroient toute l'architecture.

149. L'on a vu quelquefois des péristyles terminés par des corps lisses, mais l'on n'en a jamais vu qui fussent terminés d'un côté par un corps lisse, et de l'autre par un corps décoré de colonnes. Il faudroit donc pour conserver la simétrie, qui est sans contredit une des premières règles de l'architecture, masquer aussi les colonnes qui sont aux abouts de chaque nef, de sorte qu'outre les 8 massifs à faire contre les piliers, il faudroit encore en faire 8 autres vis-à-vis de ceux-ci. Il faudroit même, si on

vouloit observer une simétrie exacte, faire des corps lisses de toutes les colonnes, demi-colonnes ou quart de colonnes qui répondent immédiatement à celles-ci et qui sont au nombre de 24, de sorte que sur les 132 colonnes qui décorent ce monument, il y en auroit 56 transformées en corps lisses, la plupart fort maigres et désagréables à la vue.

L'on appauvriroit donc extraordinairement un monument très-riche, sur-tout par les sculptures des frises et des plafonds, et des voûtes qui n'auroient plus aucun accord avec l'architecture inférieure, tant il est vrai que dans une belle ordonnance d'architecture on ne peut rien changer sans tout détruire.

Projet du citoyen Brongniard.

150. Le citoyen Brongniard, frappé sans doute de tous ces inconvéniens, a cherché à les corriger en partie. Il ne supprime pas les colonnes; il forme dans l'entre-colonnement un corps de maçonnerie à-peu-près aussi saillant que celui proposé par le citoyen Rondelet, mais isolé des colonnes; et pour soutenir les panaches qui ne le sont pas dans le premier projet, il place sous ces panaches et devant les pans coupés quatre grands obélisques sur des piédestaux.

Fig. 7 et 8.

151. Le citoyen Brongniard a bien vu l'endroit où il convenoit d'opposer la résistance au poids; il est certain que c'est à l'endroit où il place ces obélisques, ou proche de cet endroit, qu'il faut mettre le point d'appui, puisqu'il se trouve à-peu-près placé sous le centre de gravité commun de la partie de ce dôme qui porte directement sur les piliers, et si ce point d'appui étoit suffisant, il n'en faudroit certainement pas d'autres. Mais le plan de cet obélisque dans la partie où il porte n'a qu'une surface extrêmement petite en comparaison du poids qu'il a à porter; il arriveroit nécessairement de-là ou que les pierres supérieures qui n'ont pas cinq pieds de superficie quand même elles pénétreroient d'un pied dans le panache pourroient s'écraser, ou que, si elles résistoient, la partie qu'elles porteroient étant fort petite en comparaison des parties voisines qui tasseroient toujours, il

se feroit nécessairement une disjonction entre la partie portée et celle qui ne le seroit pas, et il seroit à craindre qu'il ne se formât 8 fentes du haut en bas du tambour et des voûtes qui y porteroient le plus grand dommage.

152. Si l'on considère ensuite que ces obélisques auroient le double de la hauteur des colonnes, que leur volume seroit huit fois plus considérable que chacune d'elles, on concevra aisément que quatre monumens aussi marquans et aussi volumineux sur lesquels l'œil s'arrêteroit de préférence à tout, rendroient toute la grande architecture de cet édifice petite et mesquine. Ce que l'on peut voir même assez sensiblement sur le dessin fig. 8 et bien mieux sur le modèle. Les obélisques rendroient toute l'architecture petite et mesquine.

153. L'on sait assez que c'est un principe reçu chez les architectes que ce sont toujours les colonnes qui doivent dominer dans une composition d'architecture, sur-tout lorsqu'elles portent tout et ne servent pas seulement d'ornemens; comme on ne juge que par comparaison, on ôteroit totalement au Panthéon par cette seule adjonction, l'air de grandeur et de majesté dont on est véritablement saisi en entrant dans ce monument. Il paroît même qu'il seroit difficile de trouver un moyen qui fut plus nuisible à la beauté de l'architecture que cette construction quoiqu'elle ne détruise rien; il ne paroît pas moins certain qu'elle ne serviroit qu'à bien peu de chose pour remédier au mal et même qu'elle pourroit être très-nuisible.

154. Les massifs que le citoyen Brongniard propose de placer entre les colonnes, ne sont guère que la moitié de ceux qu'à proposé le citoyen Rondelet, et par conséquent porteroient moitié moins malgré tout l'art que l'on pourroit employer pour les décorer ainsi que l'obélisque; il n'en résulteroit pas moins que ces massifs seroient disparates puisqu'ils ne pourroient se répéter ailleurs, et que, pour qu'il y eût quelque accord, il faudroit aussi décorer plusieurs autres entre-colonnemens, ce qui ôteroit le nouveau caractère que l'on a voulu imprimer à cet édifice relativement à Les murs ajoutés par le cit. Brongniard ont une grande partie des inconvéniens de ceux du citoyen Rondelet.

sa destination actuelle, en retranchant tous les ornemens accessoires et indépendans de l'architecture que l'on a pris à tâche de conserver dans toute sa pureté.

Ces deux projets ne pourroient s'exécuter sans causer de grands ébranlemens.

155. On observera principalement que ces massifs entre les colonnes, ainsi que ceux qu'a proposé le citoyen Rondelet, ne peuvent remplir l'objet pour lequel on les propose qu'en faisant de forts incrustemens dans les piliers et sur-tout dans les encorbellemens qu'il faudroit remplacer en entier; car ces encorbellemens, n'ayant que 3 pouces de saillie, ne pourroient pas servir efficacement à porter le poids, si on n'incrustoit pas les pierres dans la maçonnerie d'un pied au moins, sans quoi le poids ne se reporteroit pas sur les nouvelles enveloppes qui ne seroient que plaquées contre les piliers; mais des incrustemens aussi considérables qu'il seroit nécessaire ne pourroient, sans contredit, s'effectuer sans de grands ébranlemens qui produiroient infailliblement de nouveaux éclats, non-seulement dans la partie inférieure, mais bien davantage dans la partie supérieure près de laquelle on travailleroit et de-là se porteroient jusques sur les arcs, d'où il pourroit résulter de grands dangers : l'on a répondu à cette objection que les liaisons seroient prises en faisant les arrachemens dans les endroits où l'on a déja fait des remplacemens de pierres fendues ou éclatées, mais ces arrachemens ne sont pas moins difficiles dans ces endroits que dans d'autres, parce que les pierres incrustées sont exactement calées avec de l'ardoise et scellées exactement. On a reconnu cette vérité en faisant les sondes dans un des piliers.

On a proposé de ceintrer les arcs-doubleaux.

156. Ces dangers et ces inconvéniens sont bien reconnus par tous les artistes qui se sont occupés de la restauration des piliers du dôme du Panthéon, aussi a-t-on d'abord proposé d'étayer ce dôme et pour cet effet de placer sous les arcs-doubleaux des ceintres qui soutiendroient une partie du poids et déchargeroient les piliers.

157. On a d'abord objecté qu'il seroit difficile de former des ceintres en bois qui ne tassassent pas sous une aussi grande charge

que

que celle qu'ils auroient à supporter et que les étais même en bois de bout se refouleroient nécessairement. Les architectes, pour répondre à cette objection, ont observé que ces ceintres ne porteroient pas le douzième du poids du dôme.

158. L'on voit dans la deuxième table ci-dessus (136) que les arcs-doubleaux porteroient 8,711,083 liv. dont les ceintres porteroient les $\frac{2}{3}$ (mém. de l'acad. 1729), c'est-à-dire, 5,807,588 liv., qui est au moins le cinquième du poids du dôme au lieu du douzième; mais comme cette charge se reporte presque en entier sur les piliers, il peut néanmoins se faire qu'elle ne soit que le douzième du poids total, comme l'ont dit les architectes.

Poids que porteroient les ceintres.

159. Au reste, quelque soit cette charge, il n'est pas douteux que l'on ne puisse empêcher les arcs-doubleaux de baisser en serrant les assemblages des bois avec des coins de fer à mesure de leur refoulement, ou en étayant ces arcs avec des piliers de pierres posées sans mortier: il y auroit cependant à craindre que ces mêmes arcs étant extraordinairement refouillés par des ornemens, les sculptures ne fussent écrasées pour peu que le poids portât sur les ceintres, quand même on rempliroit en plâtre tous ces refouillemens, parce que le plâtre ne peut pas avoir la même consistance que la pierre.

160. Mais ce qu'il y a de plus important à observer, c'est que si l'on parvenoit par des ceintres en bois, ou en pierres, ou par des étais quelconques à soutenir efficacement la partie supérieure des arcs-doubleaux et l'empêcher de baisser, tandis que la partie inférieure de ces arcs près des naissances, qui ne peut être soutenue, baisseroit avec les piliers, il se feroit nécessairement une disjonction dans ces arcs et huit lézardes du haut en bas de la tour du dôme et de ses voûtes, ce qui lui porteroit le plus grand dommage, tandis que le dôme continuant de descendre d'une seule pièce et sans aucune désunion, il n'en résulte pour ce dôme en particulier aucun inconvénient ni dommage. Le seul inconvénient est pour les piliers, c'est donc eux seuls qu'il faut avoir en vue de consolider.

Les ceintres pourroient faire courir de grands risques.

Mais il est plus probable qu'ils ne serviroient à rien.

161. Si on convient que la charge qui porte sur les arcs n'est que du douzième du poids du dôme, il est évident que les piliers en portent les $\frac{11}{12}$; or, un douzième de charge de moins sur les piliers n'est certainement pas un objet assez considérable pour que les incrustemens que l'on sera obligé de faire n'occasionnent les mêmes éclats aux pierres et les mêmes accidens qui y sont arrivés lors des réparations qu'on y a faites; par conséquent si ces ceintres tassent avec les piliers, ils ne sont utiles à rien; et s'ils ne tassoient pas, ils seroient très-nuisibles; ainsi dans l'une et l'autre hypothèse ils doivent être proscrits.

Il faut cependant trouver les moyens de soulager les piliers d'une partie du poids du dôme.

162. Il s'agit donc de trouver les moyens de soulager les piliers d'une partie considérable du poids du dôme, avant que de faire les réparations nécessaires aux colonnes et piliers, car il ne suffit pas même de réparer solidement ces dégradations; mais ce qui est bien plus important sans doute, il faut s'attacher à ce que les tassemens sur les piliers ne puissent se continuer. Il ne suffit pas pour cet effet de faire porter les pierres que l'on remplacera sur une largeur plus considérable que celle sur laquelle elles portent à présent; il faut chercher à arrêter la cause même de ce tassement en faisant porter le poids, ou une partie du poids, sur d'autres points d'appui que les piliers.

Il faut faire porter une partie du poids du dôme sur les murs de l'édifice.

163. J'avois proposé, dans l'ouvrage que je fis imprimer en 1771, de décharger ces mêmes piliers d'une partie du poids considérable qu'ils devoient porter, en faisant distribuer une grande portion de cette charge sur les autres parties de l'édifice, et principalement sur les gros murs qui forment des masses très-considérables, ce qui pouvoit se faire de telle sorte que les piliers n'eussent presque porté que leur poids.

Soufflot a dû avoir cette même vue.

164. Soufflot a eu sans doute la même vue en construisant les quatre arcs-boutans qui soutiennent les quatre escaliers extérieurs servant à conduire à la tour du dôme; mais les fenêtres dont les murs étoient percés ne lui avoient pas permis de les placer assez bas, de sorte qu'ils ne peuvent soutenir qu'une bien pe-

tite portion de la partie supérieure du dôme, en s'appuyant désavantageusement sur le haut des murs où ils font peu d'effet.

165. Mais depuis que l'on a bouché, avec grande raison, les fenêtres qui seules avoient empêché probablement Soufflot de suivre cet avis, ce qui n'a pas été fait alors peut s'exécuter actuellement avec autant d'avantage que si on l'eût fait pendant la construction.

166. Pour cet effet les inspecteurs-généraux ont proposé de construire dans la galerie extérieure, qui sert à donner du jour au dôme, de forts arcs-boutans (fig. 1) BCEG, ADFH, qui, par le moyen de branches circulaires BC, AD embrassent d'une part le derrière des piliers, et se divisent en trois branches dans le bas, dont deux FH, EG s'appuient sur les murs, et celle du milieu sur le pan coupé extérieur. Ces arcs-boutans prennent leur origine le plus bas possible en M (fig. 4), et seulement à 7 pieds ÷ du sol des tribunes, afin de laisser l'échappée convenable pour y entrer, et ne s'appuient dans le bas que contre les gros murs, en observant des décharges bombées sur les plates-bandes des colonnes engagées dans les murs. La courbure du plan donne lieu à changer insensiblement la direction de la poussée, qui d'abord est dans la direction de la diagonale et qui se reporte sur les gros murs qui déclinent de 45 degrés sur cette diagonale.

Projet proposé par les inspecteurs-généraux des ponts-et-chaussées.

167. Pour construire ces arcs-boutans, on ne toucheroit à aucune partie de la maçonnerie qui porte les grands arcs. Il y avoit derrière le pan coupé un corridor NP (fig. 1) qui a été rempli en partie en moëlons, ainsi que les fenêtres. On se contentera d'ôter ce remplissage en moëlons, et de le remplacer par un massif de pierres dures, taillées en coupe suivant la direction que l'on doit donner à la poussée de l'arc-boutant, pour venir s'appuyer directement sur les fondations. Les deux branches EG, FH se continueront dans les croisées voisines (fig. 3) en K et en I qui ne sont bouchées qu'aux paremens et qui seroient remplies en totalité par des voussoirs posés en coupe, et en continuation de ceux de la partie supérieure des

arcs-boutans. L'on ne fera d'autres dégradations pour lier ces remplissages aux murs que d'abattre les arrêtes verticales des pierres pour leur donner l'inclination des coupes des voussoirs, ce qui peut se faire au ciseau et même à la scie sans causer de grands ébranlemens.

Manière de faire les entailles.

168. Pour lier l'arc-boutant au pilier, on fera dans le parement du derrière de ce pilier des entailles, afin d'appuyer les différentes parties de l'arc-boutant suivant la direction de la poussée; et comme il est essentiel de causer le moindre ébranlement possible, on fera toutes ces entailles à la scie, et on employera à cet effet la scie cilindrique dont on s'est servi pour former des tambours de colonnes dans un édifice de forme ovale que l'on a construit, il y a quelques années, derrière le Temple à Paris. Par ce moyen les entailles seront concaves dans les parties qui servent à porter, et pour les parties droites on y employera une scie en forme de plateau rond : ces deux espèces de scie, ayant un mouvement de rotation, sont très-expéditives; de cette manière toutes les entailles sont uniformes et égales, et les pierres servant de points d'appui étant cilindriques, sont beaucoup moins sujettes à se fendre et à s'éclater que lorsqu'elles sont angulaires, de sorte que l'on peut faire ces entailles sans donner un seul coup de marteau et même sans se servir de ciseau.

Description de la scie cilindrique.

169. La machine que l'on peut employer à cet effet est une espèce de tour en l'air qui porte un cilindre creux de 18 à 20 pouces de diamètre sur 2 à 3 lignes d'épaisseur et 1 pied de longueur, que l'on peut faire mouvoir par un engrenage, ou plus simplement par une grande roue à poulie qui communique son mouvement à la poulie fixée à l'arbre du tour. Cette roue est mise en mouvement par le moyen d'une manivelle à laquelle on peut appliquer plusieurs ouvriers. L'arbre du tour sera poussé par derrière par un ressort ou un poids qui fera avancer le cilindre creux qui prend en tournant le grez pilé placé par dessous sur une planche; le plateau de fer mince sera adapté au même

tour pour détacher chaque entaille ; pour cet effet la machine avancera horizontalement au moyen d'un poids. Pour faire les incrustations ordinaires, il faut nécessairement se servir de la masse et du poinçon pour emporter avec grande peine quelques éclats et parvenir à arracher les pierres à une certaine profondeur ; ce qui ne peut se faire sans occasionner de grands ébranlemens.

170. On remarquera par le plan que les arcs-boutans sont presque en entier hors des tribunes et dans la galerie destinée à recevoir les eaux des toits et donner le jour aux nefs : il n'y a qu'une très-petite partie de ces arcs-boutans qui paroisse dans les tribunes ; mais elle suit la voûte circulaire qui en fait le plafond, et ne masque que l'un des quatre pendentifs. Ce même plan du pendentif sera continué à-plomb jusqu'au sol de la tribune, et l'on observera dans cette partie, et au milieu en C et D, deux portes par lesquelles on y entrera ; ces portes seront placées régulièrement en ce qu'elles seront opposées aux deux parties ouvertes de la tribune. On fermera par un parpain la face qui donne sur la galerie, qui par ce moyen fera simétrie à la face qui est contre le pilier, ce qui donnera plus de régularité qu'il n'y en a actuellement. On pourra aussi, pour donner plus d'échappée, baisser le palier de l'escalier, en pratiquant quelques marches dans l'épaisseur de l'arc construit au-dessus de l'architrave.

Les arcs-boutans ne gâtent aucunement la décoration, fig. 1.

171. Ces arcs-boutans peuvent avoir neuf pieds de largeur sur sept pieds de hauteur dans la partie la plus étroite, ce qui présente plus de 60 pieds de surface. On pourroit même leur en donner davantage ; mais pour que ces arcs-boutans produisent tout l'effet que l'on a droit d'en attendre, il faut user de plusieurs précautions que l'on croit nécessaire d'indiquer ici ; ils doivent être formés de pierres fort dures et de même qualité que celles qui ont servi à construire les quatre grands arcs qui portent la colonnade extérieure. Cette pierre, que l'on tire de Vaugirard, est à-peu-près aussi dure que celle dont sont formées les colon-

Détails de construction des arcs-boutans.

nes, mais s'éclate moins aisément; elle ne se taille pas aussi proprement, mais cela n'est pas nécessaire ici. Les lits doivent être bien dégauchis et usés au grez pour qu'ils se touchent exactement, et les pierres posées à sec sans mortier; mais on introduira lorsqu'elles seront posées, un coulis d'un lait de chaux mêlé de ciment fin, de limaille de fer et de poussière de chaux vive. Ce coulis étant composé de matières qui augmentent de volume, remplira exactement tous les vuides et serrera les pierres contre les piliers et les murs, de sorte que les parties supérieures des piliers ne pourroient baisser sans faire écraser les pierres que l'on auroit mises en remplacement dans les passages qui avoient été pratiqués derrière les pans coupés et sans faire reculer les murs de long-pan de l'édifice qui forment l'angle rentrant et qui sont réunis par le pan coupé.

Les remplissages ne peuvent pas plus s'écraser que les arcs-boutans.

172. Les remplissages faits comme on l'a indiqué, pour les arcs-boutans, ne pourroient pas plus s'écraser qu'eux-mêmes, puisqu'ils ont pour le moins autant de surface portante qu'eux: d'autre part la résistance qu'opposeroient les murs de long-pan, équivaut à celle d'une culée qui seroit dans la direction de la diagonale d'un parallélogramme dont ces murs forment les côtés. Cette diagonale auroit plus de 100 pieds de longueur, et la résistance seroit si considérable que l'on peut bien regarder ces points d'appui comme inébranlables.

Calculs auxquels ces arcs-boutans ont donné lieu.

173. Mais comme ce projet a été vivement combattu par les architectes, il est nécessaire de mettre ici tous les calculs à quoi ils ont donné lieu, soit pour prouver leur solidité et leur effet, soit pour répondre aux objections que l'on a faites contre leur exécution.

Parties portées par les piliers et par les arcs.

173. Il a fallu d'abord calculer le poids des différentes parties du dôme qui portent sur les arcs-doubleaux et celles qui portent sur les piliers seuls, et pour cet effet on a supposé une séparation au milieu des fenêtres qui sont sur les reins des arcs-doubleaux, parce que le reste du dôme porte beaucoup plus sur

les panaches et les piliers que sur les arcs; par cette supposition, qui doit beaucoup approcher du vrai, les arcs ne portent que la moitié de la voûte extérieure, la moitié de la voûte inférieure, et la moitié de la tour du dôme jusqu'aux panaches; ils portent encore un quart de la plate-forme et du plafond de la colonnade. La voûte du milieu du dôme est portée entièrement sur les piliers ainsi que la majeure partie des panaches, les escaliers de la colonnade et la moitié des voûtes sur les tribunes et de leurs plafonds; on a aussi distingué ce qui est porté par les piliers au-dessus des arcs-boutans et ce qui est porté au-dessous.

Ils ne doivent porter qu'une partie du poids, mais ils pourroient le porter en entier.

175. Les arcs-boutans sont proposés pour faire cesser le tassement des piliers et empêcher que le dôme ne continue à descendre : il ne seroit pas nécessaire qu'ils fussent assez forts pour porter le dôme en entier, mais seulement pour le soulager d'une partie de son poids, quoiqu'on pût bien les construire de telle sorte qu'ils portassent le poids entier, et l'on verra par les dimensions qu'on leur a données que la chose est très-possible; le poids du dôme entier, jusqu'au centre de gravité des arcs-boutans à l'endroit où ils le soutiennent, est (136) 9,569,363 + 6,974,358 + 8,711,083 = 25,254,808 liv., ainsi chacun soutient 6,313,700. L'on voit (fig. 4) que la direction de la charge doit être prise du centre de gravité D de la partie de l'arc-boutant qui porte au centre de gravité C de la partie qui est portée, ainsi cette direction est la ligne DC, en formant le parallélogramme DECF. Si la ligne DE exprime le poids du dôme, la ligne DC exprimera la charge de cet arc-boutant dans la direction CD, et comme ces deux lignes sont entre elles comme 12 : 21 ou :: 4 : 7, on aura cette charge $= 7 \times \frac{6313700}{4} =$ 11,048,975.

Chaque pied quarré ne porteroit pas le tiers du moindre poids qu'il peut porter.

176. La surface de la coupe de ces arcs-boutans étant dans la partie la plus étroite $= 9 \times 7 = 63$, chaque pied quarré portera $\frac{11048975}{63} =$ 159,507, ce qui n'est pas le tiers du moindre poids que chaque pied quarré de pierre peut porter lorsque l'on fera porter les pierres sans intermédiaire les unes contre les au-

tres comme on propose de le faire ici. Il est donc bien certain que ces arcs-boutans seroient quatre fois plus forts qu'il ne faudroit pour porter le dôme en entier, à plus forte raison pour n'en porter qu'une partie.

Il s'agit de voir à présent ce que porteront les arcs-boutans inférieurs dans l'emplacement du corridor rempli, et la force avec laquelle la partie qui s'appuie contre les murs pousseroit ces murs.

La partie du milieu porteroit près de dix-huit fois davantage.

177. Cette pression se divisera en trois parties à-peu-près égales, puisque les lignes FN, NP, PE (fig. 1) sont égales, ainsi chacune de ces pressions sera $\frac{11048975}{3} = 3,682,992$. En tirant la ligne AK (fig. 4), qui marquera la direction de la charge sur les fondations, et formant le parallélogramme AIGH, dont les côtés AG, AH, AI sont entre eux comme 18, 11 et 12, la force AG $= 3,682,992$ se divisera en 2 actions AH, AI : la première AH se dirigera contre les fondations, et l'autre AI se dirigera horizontalement. Cette action AH sera à l'action AG :: 11 : 18, ce qui donnera AH $= \frac{3682992}{18} \times 11 = 2,250,717$. La surface du vuide NPK (fig. 1), sur lequel ces arcs-boutans s'appuient, étant de 80 pieds au moins, chaque pied quarré porteroit $\frac{2250717}{80} = 28,137$ liv., qui n'est guère que la dix-huitième partie de 500,000, qui est le moindre poids que peut porter chaque pied cube.

Les parties de côté porteroient au moins 8 fois davantage.

178. L'action des deux autres branches de l'arc-boutant se dirige dans la longueur des murs à-peu-près suivant l'inclinaison CG de 45 deg. (fig. 4), et occasionne aussi dans ce sens une pression de 3,682,992 liv. contre le mur, sur environ 12 pieds de largeur HG, qui est celle de ces branches, à leur jonction avec les murs. Ces murs ayant 5 pieds d'épaisseur, la surface qui reçoit tout l'effort est $5 \times 12 = 60$; ainsi chaque pied quarré porteroit $\frac{3682992}{60} = 61,382$ liv. qui n'est pas la huitième partie de 500,000 que peut porter chaque pied cube; ainsi l'on peut donc être assuré que la résistance qu'opposeront les murs et les pans coupés

à

à la poussée des arcs-boutans est plus que suffisante pour que les pierres ne puissent ni se fendre, ni s'éclater lorsqu'elles seront posées sans intermédiaire de mortier ni de cales.

179. Cette poussée des arcs-boutans étant très-considérable, il est question de s'assurer si les murs de long-pan sont réellement suffisans pour que leur masse les empêche non-seulement de se renverser, mais encore de reculer sur leurs fondations. A cet effet il faut considérer que ces deux murs font l'effet d'un seul qui seroit dans la diagonale d'un parallélogramme dont les lignes AR, AC seroient les côtés, et qui auroit (fig. 15) 114 pieds de longueur moyenne. Le centre d'impression de l'arc-boutant contre le pan coupé se trouvant au point C (fig. 4), à 48 pieds de hauteur au-dessus du sol et 72 pieds au-dessus des fondations, il est aisé de voir que quand même la direction de la poussée se continueroit suivant l'angle de 45 deg., elle ne s'étendroit pas encore jusqu'à l'extrémité du mur en diagonale qui remplacera les deux autres, puisque ce mur auroit 114 pieds de longueur, par conséquent la perpendiculaire élevée de l'extrémité du mur sur cette direction, seroit nulle ou même négative, ainsi la puissance agissante n'ayant pas de bras de lévier, à l'extrémité duquel elle puisse agir, ne peut faire aucun effet pour faire renverser les murs.

La poussée se dirigeant sur les fondations, ne peut ni faire renverser les murs, ni les faire glisser.

180. Elle n'en auroit pas davantage pour le faire glisser puisque s'appuyant sur la base des murs, elle tend plutôt à leur donner de la stabilité qu'à leur donner un mouvement quelconque.

181. Il faut cependant considérer qu'il pourroit arriver que les constructions à faire pour les arcs-boutans exerçassent contre les murs de long-pan une action horizontale qui fut suffisante pour les faire glisser, par conséquent il est bon de connoître quelle seroit cette force si on ne trouvoit pas le moyen de s'opposer à son action.

Examen de la poussée horizontale contre le centre d'impression.

182. Cette force agissante, suivant l'inclinaison CD de 45 dégrés, et qui est = 3,682,992 (177), peut se diviser en deux forces,

l'une horizontale, et l'autre verticale. La force horizontale est à cette force inclinée :: CE : CD, ou :: 12 : 18, et par conséquent elle sera $\frac{3,682,992}{18} \times 12 = 2,455,328$.

183. Indépendamment de cette action, il en résulte encore une autre provenant de la branche du milieu de l'arc-boutant, suivant la direction JK (fig. 1), qui est la même force et qui se divise en deux autres JL, JM, et qui sont $= \frac{2,475,328}{7} \times 5 = 1,768,092$. Cette action, jointe à la précédente 2,455,328, donnera 4,223,420, total de l'action horizontale qui tendroit à faire glisser la partie supérieure des murs sur l'assise qui se trouve vis-à-vis le centre d'impression des arcs-boutans; la résistance à opposer à cette force ne peut être que la force d'inertie de la partie du mur, qui se trouve au-dessus.

184. La longueur de ce mur du côté de l'entrée est de 96 pieds, du côté du chevet de 84, et du côté des petites nefs de 66, et comme l'on peut diriger la force d'impression de l'arc-boutant proportionnellement à ces longueurs, on prendra la plus petite longueur moyenne, qui sera de 75 pieds du côté du chevet : sa largeur moyenne est de 6 pieds, et la hauteur AB (fig. 4) de 26 pieds. Le cube sera $75 \times 6 \times 26 = 11,700$ pieds, et comme le poids de chaque pied cube est 156 liv. le poids total du mur sera 1,825,200, qui est à la force d'impression 4,223,420 (183) :: 18 : 42 :: 3 : 7.

Force nécessaire pour faire glisser deux pierres l'une sur l'autre.

185. Il est d'expérience que pour faire glisser l'une sur l'autre deux pierres taillées et non polies, il faut employer une puissance horizontale égale au moins au poids que l'on veut faire glisser, et cette puissance est bien plus grande lorsque les pierres ne sont que rustiquées, d'où il résulte que si l'assise sur laquelle s'exerceroit la pression horizontale de l'arc-boutant étoit posée à sec et taillée proprement, cette pression horizontale pourroit avoir une force plus que double de la résistance, et feroit par conséquent glisser la partie supérieure du mur; mais la maçonnerie étant rustiquée sur ses lits d'une part, et liée par un mortier qui est employé depuis plus de 20 ans, a pris pendant ce tems assez de

consistance pour ne pouvoir être séparée que par une force considérable, et il suffiroit qu'elle fut plus que double de celle qu'il faut employer pour faire glisser la pierre, pour n'avoir aucune crainte que la partie supérieure des murs pût éprouver quelques mouvemens vis-à-vis le centre d'impression des arcs-boutans, quand même ces arcs-boutans porteroient seuls tout le dôme.

186. Cependant quelque peu fondée que puisse être cette crainte, on doit convenir que si la poussée étoit assez forte pour opérer quelques effets ce seroit là où elle se manifesteroit, et par conséquent qu'il est bon de prendre des précautions pour que cela n'arrive pas.

187. On doit encore observer que si les arcs-boutans s'appuyoient simplement sur les murs au niveau des galeries, les joints de la partie inférieure de ces murs se comprimeroient par la charge, et qu'il faut nécessairement prévenir ces deux effets. Il suffira pour cela de remplir, en pierres de taille dégauchies et posées à sec, les vuides du passage que l'on avoit laissé derrière le pan coupé et celui que l'on avoit laissé au-dessus, ainsi que les deux fenêtres qui le joignent; une partie de ce remplissage a déja été fait, il y a peu de tems, mais il reste encore plus de moitié de vuide aux fenêtres et on a employé du moëlon dans quelques parties, il faudra donc défaire ce qui a été fait en dernier lieu, et remplir tout le vuide en pierres de taille posées sans mortier sur des lits parfaitement dégauchis et taillés en coupe pour reporter la charge sur les fondations; par ce moyen l'action horizontale sera absolument nulle sur la partie inférieure de l'arc-boutant placée derrière le pan coupé, dont le plan ne sera que d'un cinquième moins étendu que le profil de l'arc-boutant dans la partie la plus mince, ainsi on pourroit ne faire porter à chacun des murs que le dixième du poids que doit porter chaque arc-boutant, ce qui seroit alors bien au-dessous de la résistance, ce poids est (183) 4,223,420, dont le dixième n'est que 422,342.

188. Cependant pour ne rien risquer, il faudra placer les lits

Il faut placer les lits des

pierres de remplissage perpendiculairement à la poussée.

de pierres dans le remplissage des fenêtres suivant une direction perpendiculaire à la direction HL (fig. 3) pour la fenêtre la plus proche de l'angle, et perpendiculaire à CF pour les autres. On voit que de cette manière, la première direction renvoie la poussée sur la fondation, et que les autres se partagent entre la direction horizontale et la direction verticale, et s'étendent sur toute la fondation; elles ne pourroient donc agir horizontalement qu'en K et en I dans une partie du mur presque deux fois plus chargée que si elles eussent agi au point C, où la résistance seroit environ deux fois moindre. On voit par conséquent qu'au moyen de l'arrangement à donner aux pierres avec lesquelles on fera le remplissage des fenêtres, et sans toucher aucunement au massif des murs, on dirigera à volonté la poussée des arcs-boutans, de telle sorte que l'on ne pourra avoir aucune crainte fondée qu'elle agisse pour faire reculer les murs, et qu'en distribuant la pression horizontale dans tout l'espace compris entre les lignes GJ, HL, qui, au niveau des fenêtres, occupent une longueur et une surface de 40 pieds quand même on ne compteroit que sur les plumées. La surcharge n'étant sur cette étendue que de 422,342 liv. (187), ce qui ne fait par pied quarré que 10,558, qui n'est que la quarante-sixième partie de ce que peut porter le pied cube; ainsi, sous quelque point de vue que l'on considère les arcs-boutans proposés, on ne peut douter qu'ils ne fussent plus que suffisans pour soutenir la totalité du dôme si l'on en avoit besoin.

Comparaison sensible.

189. Et pour le faire concevoir par un exemple sensible, on peut se représenter un modèle du dôme du Panthéon de 15 pieds de diamètre, c'est à dire, du quart de celui du Panthéon, ou de la grandeur d'une chambre ordinaire, l'on se persuadera aisément qu'il seroit aisé de soutenir ce modèle, qui peseroit la soixante-quatrième partie du dôme actuel, par quatre étaies perpendiculaires de deux pieds quarrés, ou de la soixante-quatrième partie de la surface des piliers, et que si ces étaies n'étoient pas assez fortes, l'un des meilleurs moyens de les décharger seroit de placer quatre

autres étaies inclinées derrière celles-ci qui feroient le même effet que les arcs-boutans proposés ; et pour convaincre davantage encore on a fait faire un modèle de la masse du dôme, portée sur les piliers et sur des arcs-boutans pareils à ceux que l'on a proposés ; pour faire voir que ces arcs-boutans suffisent seuls pour porter le dôme ; on supprime en entier les piliers et l'on charge la base du dôme d'un poids équivalant au dôme entier, même au double de ce poids, et les arcs-boutans soutiennent tout ; de sorte que, si l'on eût pris ce parti en construisant l'édifice, on auroit pu fort aisément supprimer les piliers, en ne laissant que les trois colonnes qui y sont engagées, puisque ces colonnes auroient réellement pu ne porter aucune partie du dôme.

190. On a objecté que l'effort nécessaire pour soutenir par le moyen des arcs-boutans, le poids de la partie du dôme qui est au-dessus, seroit si considérable que les branches de ces arcs-boutans, qui doivent embrasser l'angle des piliers du dôme et celui des murs opposés, se briseroient, et même que les murs réunis contre lesquels on dirige cet effort, qui seroit d'environ 144 millions, n'auroient pas assez de masse pour y résister, puisqu'ils ont déja cédé à la poussée des grands arcs qui soutiennent la colonnade.

Objection avancée sur la direction de la poussée des arcs-boutans.

191. Ceci est une assertion qui doit être fondée sur un calcul. Il auroit donc fallu donner ce calcul, car il n'est pas aisé de persuader sans preuve que des étaies qui ne portent que 24 millions, poussent des murs avec un effort six fois plus grand. Cependant l'on croit appercevoir sur quelle hypothèse le citoyen Rondelet a fondé son assertion ; car il dit que le dernier joint incliné, sur lequel doit tomber la charge de la partie du dôme à soutenir, forme avec l'horizon un angle de 79° 40''. C'est probablement sur ce joint PM, fig. 4, qu'il a supposé un effort perpendiculaire PO, et qu'en formant un parallélogramme PMNO, dont la direction de cet effort est la diagonale PO ; et dont les côtés sont l'horizontale PN et la verticale PM, il trouve

cette puissance résistante dans le sens de la diagonale de 144 millions.

192. Mais pourquoi a-t-il pris le premier joint PM, et non pas le second, le troisième et le huitième; il auroit pu prendre de même (fig. 3) le joint vertical OP, et alors il auroit trouvé l'infini pour la ligne PO, au lieu de 144 millions. Ce n'est pas de cette manière, en se formant des hypothèses à son gré, que l'on doit calculer les forces mouvantes.

Calcul de la charge des étaies.

193. Le calcul d'une étaie est aisé; elle porte en haut et s'appuie en bas, en tirant une ligne droite DC (fig. 4) du centre de gravité D de la surface, qui porte le poids au centre de gravité C de la surface sur laquelle elle s'appuie. Cette ligne forme avec l'horizon un angle CDE, et la puissance qui porte dans la direction DC de l'étaie, est à celle DE, qui appuie verticalement comme le sinus total est au sinus de l'angle d'inclinaison de l'étaie avec l'horizon. Ici cet angle est d'environ 35 degrés, et comme le poids total du dôme, qui agit sur ces arcs-boutans aux points D est (175) 25,254,803, et que l'on a DC : DE :: 100,000 : 57,300, on aura l'action de ce poids, dont la direction $DC = \frac{25254803}{57300} \times 100{,}000 = 44{,}074{,}699$, et non pas 144 millions, l'on a vu ci-devant que les murs avoient beaucoup plus de force qu'il n'en falloit pour résister à cet effort.

Effets de la poussée des grands arcs de 100 pieds d'ouverture.

194. Si les murs ont cédé en quelque chose à la poussée des arcs de 100 pieds d'ouverture, avec une épaisseur à la clef six fois plus grande que celle des voûtes ordinaires des ponts, et chargés en outre d'une colonnade et de différentes parties accessoires, cet effet a été très-peu sensible; il n'en est résulté que de très-petites disjonctions dans quelques joints qui ont été réparées dans le tems et qui n'ont pas été, à beaucoup près, aussi considérables qu'on auroit pu s'y attendre. C'est une suite de la surcharge qu'ont éprouvé ces murs dans une de leurs parties, tandis que les autres n'étoient pas aussi chargées, ce qui a dû nécessairement les faire tasser de quelque chose. Il pourroit se faire de même que

la surcharge des arcs-boutans opérât aussi de nouveaux tassemens, si on ne prenoit pas quelques précautions, comme on l'a proposé, pour faire porter cette charge sur une grande partie de ces murs.

195. Au reste, ce n'est point un mal que les arcs et la colonnade qu'ils portent éprouvent quelque tassement; il seroit même avantageux que ce tassement fut égal à celui des piliers, afin qu'il ne s'effectuât pas de disjonctions entre la colonnade et le dôme, ce qui n'est cependant pas encore sensible. Au reste, le tassement des murs ne s'est fait sentir qu'au quatrième entre-colonnement vers l'extrémité des murs de long-pan, parce que la direction de la poussée de ces arcs s'étendoit jusques-là et traversoit le vuide de trois fenêtres, ce qui étoit certainement très-désavantageux pour soutenir la poussée de ces arcs.

Il seroit à souhaiter que la colonnade baissât comme le dôme.

196. La poussée des nouveaux arcs-boutans ne s'étendra, au contraire, que sur les trois premiers entre-colonnemens, et l'on doit remplir les vuides qu'ils renferment avec une maçonnerie construite convenablement pour qu'elle ne puisse éprouver aucun échec.

La poussée des arcs-boutans ne s'étendra que sur les 3 premiers entre-colonnemens

197. On a encore objecté que les arcs-boutans, ayant peu d'élévation de ceintre, pousseroient plus qu'ils ne porteroient; on a même été jusqu'à craindre que la force horizontale de ces arcs-boutans qui s'appuient contre les piliers, et qui est même ici plus grande que la force verticale, ne fit rentrer en dedans la partie du cercle horizontal qui forme le tambour et contre lequel il s'appuie, et par le même moyen ne fit sortir celle qui est au-dessus des arcs-doubleaux, comme si ce cercle étoit élastique; mais l'on a fait voir qu'il n'étoit pas question de quatre étaies isolées qui pousseroient effectivement du côté de l'intérieur, mais que les quatre arcs-boutans, étant directement opposés deux à deux, contrebuttent tout le dôme contre l'entablement, et le stilobate dans une partie QR (fig. 4), où il a jusqu'à 20 pieds d'épaisseur à cause de sa jonction avec les piliers, et que cet entablement seul forme une tour

Il n'y a pas à craindre que les arcs-boutans poussent la tour du dôme en dedans.

ronde de près de 6 pieds d'épaisseur, dont toutes les pierres de chaque assise font l'effet des clefs des voûtes et qui sont serrées dans toutes leurs parties par les branches supérieures des arcs-boutans qui, comme des espèces de mains, embrassent chacune le quart du dôme; et si la partie qui est sur les arcs-doubleaux étoit moins pressée par ces arcs-boutans que celle qui est sur ces piliers, et que cet excédent de pression de la tour sur les piliers put tendre à faire sortir au dehors du dôme la partie de la tour qui est sur les arcs, elle se trouve retenue dans cet endroit même par les voûtes des nefs, qui ont au moins 90 pieds de longueur, et sont encore appuyées par les murs des abouts des nefs, et au moyen des panaches et des voûtes en cul de four du milieu des nefs par toute la longueur de ces murs entre les péristiles.

Les arcs-boutans tendroient plutôt à faire soulever le dôme.

198. Il faut remarquer à cette occasion que si l'effet des arcs-boutans étoit de faire rentrer la tour en dedans, ils presseroient nécessairement les arcs-doubleaux, de sorte qu'ils diminueroient leur diamètre et tendroient par-là à soulever le cerveau des arcs et par conséquent la tour du dôme, ce qui fait bien voir combien ils doivent être efficaces pour soutenir cette tour et l'empêcher de baisser.

Les arcs-boutans seroient toujours nécessaires quand même les piliers n'auroient pas été dégradés.

199. Si l'on considère que les piliers sont poussés par deux puissances considérables provenant de la charge du dôme qui porte sur les arcs-doubleaux, ce qui fait la moitié du poids du dôme; ces deux puissances poussant l'une et l'autre dans la direction des deux côtés BA, CA (fig. 6) d'un quarré, il en résulte une force AD, qui est à celle-ci comme la diagonale d'un quarré est à ses côtés, et pour résister à cette poussée, il est évident que le moyen le plus efficace seroit de construire un arc-boutant sur la diagonale AE, et que sans cet arc-boutant les arcs-doubleaux poussent au vuide; ainsi, indépendamment de toute autre considération, et quand même il ne seroit arrivé aucune dégradation aux piliers, il seroit toujours à propos de construire l'arc-boutant que l'on a proposé, puisqu'il est essentiel pour

pour la solidité du dôme. On peut voir dans tous les dômes qui ont été construits que les piliers ont toujours été contrebutés dans le sens de cette diagonale, soit par des massifs dans les angles comme à Saint-Paul de Londres, au Val-de-Grâce, à la Sorbonne, aux Invalides, soit par les voûtes des bas côtés comme à Saint-Pierre, à Saint-Charles du Cours, etc., et que le dôme du Panthéon ne l'est que par des plates-bandes qui ne forment pas une bien grande résistance. Si jusqu'à présent il ne s'est montré aucun indice qui puisse faire présumer que cette force ait eu quelque action, on ne doit l'attribuer qu'à ce que le dôme ne fait encore qu'une seule masse; mais si par quelque force majeure, telle qu'un tremblement de terre ou quelques coups de tonnerre, il se faisoit des disjonctions verticales dans l'emplacement des fenêtres, comme de pareils événemens ont séparé les contreforts du tambour du dôme de Saint-Pierre, il seroit fort à craindre que la poussée des arcs agissant alors séparement sur les piliers, ils ne déversassent dans le sens de la diagonale, attendu que l'arc-boutant supérieur qui seul pourroit s'y opposer est placé en R (fig. 4) fort au-dessus de l'endroit où se fait cette poussée, tandis que les arcs-boutans adoptés par les inspecteurs-généraux se trouvent en D, et y sont opposés directement.

200. On a avancé que, pour que des étaies inclinées puissent agir avec quelque avantage, il ne faut pas que l'inclinaison ait plus du tiers de leur hauteur, tandis que les arcs-boutans en ont bien davantage; que d'ailleurs le principal avantage des étaies inclinées étoit d'être d'une seule pièce, tandis que les arcs-boutans proposés ne peuvent s'exécuter qu'avec un très-grand nombre de pierres qui, bien loin d'être dans le cas de soutenir, auroient besoin d'être soutenues, et qu'une étaie ne peut être remplacée avantageusement par une construction que lorsque l'étaie étoit à-plomb et placée immédiatement sous le fardeau.

Réponses aux différentes objections contre des étaies en maçonnerie.

On ne connoît pas de principe qui démontre que, pour que des étaies puissent agir avec quelqu'avantage, il ne faut pas que l'inclinaison excède le tiers de leur hauteur. On sait bien que moins

les étaies sont inclinées, plus elles ont de force relativement à leur hauteur; mais on peut donner à des étaies inclinées la même force qu'à des étaies directes, en augmentant la surface portante, et c'est la raison pour laquelle on a proposé de très-gros arcs-boutans pour le Panthéon. Deux étaies inclinées soutiennent aussi bien un fardeau qu'une étaie d'à-plomb, dès qu'elles ne peuvent reculer par leur pied et qu'elles ont une force suffisante. Tous les ceintres des voûtes ne sont composés que d'étaies inclinées et souvent très-inclinées; tous les arcs-boutans des églises gothiques ne sont que des étaies dont la plupart sont fort inclinées.

201. Ce que l'on dit des étaies d'une seule pièce ne peut s'appliquer qu'à des étaies en bois de 10 à 12 pouces de grosseur, et qui ont une grande hauteur; ici les arcs-boutans n'ont pas pour longueur le double de leur diamètre.

Les arcs-boutans peuvent s'employer avec autant d'avantage après la construction qu'auparavant.

202. On est convenu que les arcs-boutans auroient pu être employés avec succès dans une construction primitive, et qu'il en seroit résulté les plus grands avantages, parce qu'alors on eût été maître de donner à ces appuis les dimensions et les directions nécessaires pour résister à la poussée du poids dont ils doivent être chargés; mais on craint que dans une restauration, on ne puisse en garantir le succès en ce que les entailles qu'il faudra faire aux piliers et aux grands arcs qui soutiennent le dôme, ainsi que le poids dont il faudra charger les tribunes pendant ces constructions pourroient entraîner les plus grands inconvéniens.

On répond que quand on auroit construit les arcs-boutans dans l'origine, on ne les auroit pas construits autrement que l'on propose de les construire actuellement. On ne leur auroit pas donné d'autre direction ni d'autres appuis, et ce que l'on peut faire actuellement n'entraîne aucun danger. Il ne s'agit que d'ôter le remplissage que l'on a fait après coup dans les passages derrière les pans-coupés, et de les remplir en pierres de taille avec des lits exactement dégauchis et posées sans mortier ni cales. Le passage

forme une surface plus grande que celle qu'on donne à l'arc-boutant et par conséquent est bien suffisante.

203. On ne touche en aucune manière aux grands arcs qui soutiennent la colonnade. Au contraire, leur origine, qui n'est à présent portée que par un pilier quarré de trois pieds, seroit enclavée dans les arcs-boutans qui les consolideroient dans la partie où ils en ont réellement besoin.

On n'attaque aucunement les grands arcs de 100 pieds d'ouverture.

204. L'on a indiqué les moyens de faire les incrustemens sans danger, et les tribunes ne seroient chargées d'aucuns matériaux qui seront posés sur les ceintres à mesure qu'on les montera par dessus les murs, et s'il y a quelque dépôt à faire, ils se feront sur les plates-formes extérieures entre les murs et les vitraux; les ceintres seront portés près de la colonne d'angle derrière les pans-coupés; c'est cette partie seule qu'il sera nécessaire d'étaier de fond jusqu'à ce que l'on fasse aux entablemens des tribunes les réparations convenables.

Les étaiemens à faire ne sont pas considérables.

205. On a enfin objecté que ces arcs-boutans n'opposeroient aucune force directe à la charge de la partie du dôme qui est au-dessus des panaches et dont le centre de gravité est en dehors de leur surface.

Les arcs-boutans contribuent à porter toutes les parties du dôme.

Mais il est aisé de voir par le plan de ces arcs-boutans (fig. 1) que, se continuant jusques contre les arcs-doubleaux, et s'opposant directement à leur poussée, ils contribuent aussi à soutenir tout ce que portent ces arcs-doubleaux, et par conséquent les panaches et toute la charge qui est au-dessus de ces panaches et qui est portée encore plus directement par les piliers que par les arcs. L'on peut même voir sur la fig. 4 que l'action des arcs-boutans se dirige en DS, exactement contre ces arcs-doubleaux.

206. Quoique l'on doive être plus que convaincu que les arcs-boutans n'ont aucun des inconvéniens qu'on leur a supposés, qu'ils suffiroient même pour soutenir le dôme en entier, et qu'eux seuls peuvent arrêter le mal dans sa cause même; comme il n'y a aucun inconvénient à procurer au dôme un excès de solidité,

Quoique les arcs-boutans soient suffisans pour tout porter, on peut ce-

pendant avec eux employer encore d'autres moyens.

si l'on ne gâte pas l'architecture, et que l'on peut avoir de la peine à convaincre quelques personnes qu'une force directe ne soit pas plus efficace que toute autre, j'ai cherché un moyen pour soutenir directement la partie qui paroît l'être le moins et qui ne nuit en rien à la beauté de l'architecture.

207. On sait que quelque figure qu'ait un corps, on le soutient toujours en plaçant son point d'appui au-dessous de son centre de gravité; c'est donc au-dessous de ce centre de gravité qu'il faudroit placer l'addition de maçonnerie qu'on voudroit construire pour consolider ces piliers.

On peut ajouter un avant-corps qui au lieu de nuire à la décoration y ajouteroit.

208. Or, le centre de gravité du poids porté directement sur les piliers, se trouve à 1 pied 6 pouces en avant du pan-coupé (140); c'est par conséquent là où il faudroit placer le nouveau point d'appui, et au lieu d'y construire un grand obélisque, qui ne peut offrir qu'un point d'appui si petit qu'il peut être plus nuisible qu'utile (153), il ne seroit pas difficile d'ajouter une masse assez considérable qui, loin de nuire à l'architecture, ajouteroit même à la décoration; car il faut convenir que les pilastres pliés sur lesquels sont engagées les colonnes ne sont pas ce qu'il y a de mieux dans cette grande composition : la confusion des chapiteaux sur-tout n'est pas heureuse.

209. Au lieu de ces pilastres pliés dont on feroit des corps lisses, on pourroit placer (fig. 1 et 2) à-peu-près comme aux piliers du dôme des Invalides des avant-corps de deux colonnes FQ espacées à quatre modules de distance l'une de l'autre, et couronnés d'un entablement qui neseroit que la continuation de celui de tout l'édifice, on pourroit placer des statues entre les groupes de colonnes; mais il seroit sur-tout nécessaire de les couronner d'un groupe de figures liées au panache, ce qui ajouteroit beaucoup à sa solidité.

Description des avant corps de deux colonnes engagées.

100. L'on propose de couronner ces groupes de colonnes par des frontons pour ajouter à la décoration et remplir le double objet d'en former des monumens servant de tombeaux aux grands

hommes, et de se lier parfaitement à l'architecture; cependant on pourroit supprimer ces frontons sans lui nuire.

211. Les colonnes ajoutées seroient engagées d'un tiers dans un nouveau massif H de plus de 3 pieds d'épaisseur, placé au devant du pan coupé, et qui y seroit lié; alors le centre de gravité du poids qui porte directement sur chaque pilier seroit appuyé sur ce massif à près d'un pied $\frac{1}{2}$ dans l'intérieur et seroit soutenu très-efficacement.

212. Comme cette addition ne peut faire aucun tort à l'architecture, qu'elle ne peut même que l'enrichir dans l'endroit de l'édifice où doit être la partie la plus décorée, et que la surface seule de son plan, qui seroit de plus de 30 pieds quarrés sans compter un champfrein de 4 pouces tout au pourtour, seroit suffisante pour porter tout le poids, en posant les pierres sans intermédiaire de mortier. On peut, sans contredit, l'employer avec avantage, mais néanmoins concurremment avec les arcs-boutans qui ont seuls l'avantage de remédier à la cause même et de pouvoir être construits sans causer d'ébranlement.

213. Les avant-corps proposés ayant 5 pieds de saillie au droit de l'entablement, se trouveront très-bien liés avec cet entablement au moyen de la saillie de la corniche actuelle dont on coupera seulement la cimaise sans faire beaucoup d'inscrustemens au-dessous, en y substituant seulement quelques crampons de fer, quoique ces avant-corps, au moyen des colonnes, aient une masse assez large pour se soutenir par eux-mêmes.

Ils se lieront très-bien avec les piliers.

214. Les instrustations se feront seulement sous les panaches dans la partie supérieure et pourront même s'effectuer au trépan ou à la scie cilindrique, quoique dans cette partie il n'y ait plus rien à craindre le plan du pilier étant de 246 pieds, au lieu de 137 qu'il a à l'imposte, et les lits des voussoirs en coupe n'étant pas démaigris autant que les assises plates des piliers.

Incrustations dans les panaches seulement.

L'on observera encore que les incrustations que l'on sera obligé de faire, soit pour lier ces avant-corps aux panaches, soit pour

lier les arcs-boutans au derrière des piliers se faisant dans une partie deux fois plus élevée et deux fois plus étendue que celles que l'on feroit au-dessous de l'entablement seroient beaucoup moins dangereuses que celles-ci, quand même on ne les feroit pas avec la scie cilindrique.

Les avant-corps soutiendront principalement le devant, et les arcs-boutans le derrière.

215. Les avant-corps soutiendront effectivement le poids qui porte sur les panaches plus efficacement que sur les arcs-boutans ; mais ceux-ci soutiendront le dessus des piliers et les escaliers plus efficacement que les avant-corps, de sorte que le poids sera soutenu devant et derrière avec le plus grand avantage possible ; au lieu de quatre étaies il y en aura huit.

Différens autres projets proposés au Ministre.

216. Outre les projets donnés au Ministre par les artistes qu'il a consultés, plusieurs architectes (*) lui ont encore proposé différens projets pour consolider le dôme du Panthéon : on les fera connoître ici succinctement.

Premier projet.

L'un d'eux établit, en avant des huit colonnes engagées dans les piliers (fig. 10), huit pilastres quarrés A, qui auroient pour largeur le diamètre inférieur des colonnes, et qui seroient placés sous les arcs-doubleaux ; ils seroient couronnés de la même corniche et construits en arcs de 3 pieds $\frac{1}{2}$ de largeur sur environ 5 pieds de hauteur, en contrebas des arcs-doubleaux que portent ces colonnes engagées, ce qui leur serviroit de ceintre. Cet artiste pense qu'il soutiendroit le dôme par le moyen de ces quatre arcs, et que les colonnes engagées étant alors soulagées par les piliers, on pourroit les rétablir aisément.

Second projet.

217. Un second a proposé, au lieu de ces piliers, de placer (fig. 11) huit colonnes B pareilles aux autres, et huit autres C en avant de celles qui portent l'angle des tribunes ; il élève sur ces 16 colonnes huit arcs-doubleaux pareils à ceux du premier projet, ensuite il forme entre ces arcs-doubleaux une voûte

---

(*) Je n'ai pas cru devoir nommer les architectes qui n'ont pas fait imprimer leurs projets.

en berceau, percée de lunettes au-dessous de celles qui sont faites.

218. Un troisième (fig. 12) ne propose aucune colonne ni pilier à construire en avant; mais il remplit le dessous des tribunes par des massifs, dans lesquels seroient engagées toutes les colonnes qui soutiennent les tribunes; il forme seulement dans ces massifs de grandes niches, et pour la régularité, il fait la même chose sous les huit autres tribunes qui sont près des extrémités des nefs.

Troisième projet.

219. Un quatrième (fig. 13) forme les mêmes massifs sous les tribunes proche le dôme, et les continue dans les tribunes mêmes; il établit cependant des passages dans le bas de ces massifs pour la communication des bas côtés.

Quatrième projet.

220. Un cinquième enfin conseille de démolir le dôme, et de ne former qu'une grande calotte percée d'une ouverture de 24 pieds de diamètre, comme au Panthéon de Rome.

Cinquième projet.

221. L'on doit remarquer que tous ces architectes ont eu en vue avec grande raison de ne détruire aucune partie de l'architecture des nefs; mais les pilastres lisses du premier projet, au lieu d'enrichir l'entrée du dôme, la rendroient pauvre et formeroient des ouvertures trop élevées pour leur largeur; l'arc qu'elles porteroient deviendroit extrêmement lourd, sur-tout du côté du dôme, où il auroit 6 pieds d'épaisseur, et serviroit de ceintre pour soutenir l'arc-doubleau seul, qui n'a pas besoin d'être soutenu : il ne déchargeroit que de peu de chose les piliers qui continueroient toujours à tasser, comme on l'a assez démontré dans la discussion sur les ceintres.

Dans tous ces projets on cherche à ne rien détruire de l'architecture des nefs.

222. Le second projet paroît moins masquer l'architecture que le premier; mais il a le même inconvénient pour la grande épaisseur des arcs et pour la grande hauteur de ces arcades eu égard à leur largeur, et ces arcs ne supporteroient pas plus que dans le premier projet le poids qui porte sur les panaches. Mais le second arc, placé sous celui qui porte sur les colonnes des tribunes

Les deux premiers projets ôtent la simétrie et ne servent presque en rien à consolider le dôme.

n'auroit aucun objet d'utilité quelconque puisque les voûtes des nefs n'ont nullement périclité ; un inconvénient encore plus grand que celui-ci, c'est que par-là on abandonneroit toute simétrie dans les voûtes et dans le plan, à moins que l'on ne répétât encore ces doubles colonnes avec les mêmes berceaux aux extrémités des nefs, et néanmoins les voûtes de côté ne seroient plus d'accord avec celles ci à moins qu'on n'en formât encore huit autres sous les berceaux de côté, ce qui exigeroit encore d'autres colonnes en retour, mais elles rendroient les entre-colonnemens de côté inégaux; il faudroit donc ajouter 64 colonnes isolées aux 52 colonnes qui existent, non compris celles qui sont engagées; il faudroit même baisser les voûtes en calotte des nefs qui seroient trop renfoncées au-dessus des archivoltes, par conséquent refaire totalement les voûtes, en un mot faire presque en entier un autre monument, sans quoi point de régularité, point de simétrie, point d'accord; enfin, il faudroit faire un travail immense qui ne devroit avoir d'autre objet que de consolider des piliers que l'on ne consolideroit point du tout.

Le troisième et le quatrième ôtent à l'architecture son caractère de légéreté et ne soulagent pas plus les piliers que les autres.

223. Les deux autres projets ôteroient certainement beaucoup de légéreté à l'architecture de cet édifice, mais ne la détruiroient pas. Ils ont encore l'inconvénient de ne point soulager les piliers dans la partie où ils sont les plus chargés et d'exiger un cube énorme de maçonnerie dont la plus grande partie est absolument inutile à l'objet que l'on se propose. On peut juger assez bien de tous les différens projets que l'on a proposés, en examinant le modèle du Panthéon sur lequel on les a fait exécuter.

Exposition du projet du cit. Patte, qui propose de détruire le dôme.

224. Le cit. Patte, qui avoit déja écrit en 1770 et 1780 contre la construction du dôme du Panthéon, a écrit une lettre au Ministre qu'il a fait imprimer dans le *Journal de Paris*, le 15 prairial an 5, avec des additions. Il pense que les piliers paroissent manifestement trop foibles pour porter le dôme et qu'on proposeroit inutilement de les renforcer par le bas, parce que l'on ne pourroit espérer aucun succès de ce renforcement à cause de la difficulté

difficulté de relier cette nouvelle construction avec l'ancienne; enfin, qu'il n'y a d'autre parti à prendre que de supprimer totalement le dôme, la colonnade et la tour; c'est, dit-il, comme l'ancre de miséricorde que l'on se trouve quelquefois obligé de jeter à la mer. Il pense que cette démolition faite, malgré le désordre qui règne dans l'intérieur des piliers à raison de ce que dans leur origine ils ont été bien bâtis et appareillés, leur solidité seroit rétablie et offriroit une force suffisante pour porter la calotte qu'il propose de construire au-dessus des piliers à la place du dôme. Il dit qu'au lieu de contreforts et d'arcs-boutans, que l'architecte auroit dû employer pour remédier à l'insuffisance de ses piliers, il n'avoit employé que des liens de fer, des chaînes, des tirans, des crampons, tous moyens réprouvés en pareil cas par les bons constructeurs, parce que la solidité de l'édifice ne peut avoir de durée que celle du fer qui étant enfermé dans la pierre est par-là promptement altéré par la rouille et ne peut promettre à cet édifice qu'un courte existence.

S'il n'y avoit aucun moyen assuré de réparer les dégradations, ce projet seroit moins mauvais que les autres.

225. Il est certain que quelqu'extraordinaire que paroisse la proposition du cit. Patte, s'il n'y avoit pas de moyens assurés de remédier aux dégradations et d'empêcher la destruction du dôme, ce parti seroit préférable à celui de mutiler l'architecture, et de lui ôter le caractère de grandeur et de légéreté qu'elle a, en faisant la plupart des constructions que l'on a proposées dans son intérieur; mais nulle raison ne pourroit engager à démolir la colonnade extérieure puisqu'elle ne porte pas sur les piliers et qu'elle couronneroit seule l'édifice. La beauté intérieure de l'architecture seroit effectivement conservée dans toute son intégrité, de même que son portail et ses nefs avec leurs colonnades; mais il s'en faut bien que l'on en soit réduit à prendre ce parti extrême, et l'on pense d'après ce que l'on a vu jusqu'ici que l'on sera bien convaincu de la facilité de remédier au mal, et même que ce mal n'est pas à beaucoup près aussi considérable ni aussi dangereux qu'on a voulu le faire croire.

Discussions sur les cales de fer.

226. L'auteur du premier des projets que je viens d'analyser, conseille, comme l'ont fait les inspecteurs-généraux des ponts-et-chaussées, de poser les pierres des piliers qu'il propose sans mortier, en polissant leurs lits; mais il pense que l'on rempliroit le même objet en posant les pierres avec bain de mortier et employant des cales de fer. Cependant le choix de ces deux moyens n'est pas indifférent; l'on a déja assez remarqué combien les cales sont nuisibles, et elles le sont d'autant plus qu'elles sont plus dures, parce qu'elles portent toute la charge sur un petit nombre de points d'appui, et que lorsque cette charge est trop forte et que les cales ne peuvent pas tasser, elles font casser les pierres sous les points où elles sont posées.

Poids que peuvent porter des pierres placées sur deux appuis et chargées dans leur milieu.

227. J'ai rendu publiques (*) des expériences que j'ai faites pour connoître le poids que peuvent porter des pierres posées sur deux points d'appui et qui sont chargées dans leur milieu, et l'on en peut conclure qu'une pierre, pareille à celles du Panthéon, d'un pied de hauteur sur un pied de largeur, placée sur deux points d'appui éloignés l'un de l'autre d'un pied de distance, pourroit casser sous un poids de 175,000 liv. En appliquant la règle de Galilée, d'où l'on conclud que le poids que peuvent porter de cette manière des pierres, est en raison composée de la directe des largeurs, de l'inverse des longueurs et du quarré des épaisseurs, on trouve que les pierres du bas des piliers du Panthéon, qui n'ont que 11 pouces d'épaisseur, ne doivent porter que 147,000 liv. ; et comme quelques-unes d'elles n'ont que 1 pied $\frac{1}{2}$ de largeur, elles porteroient 220,500 liv., lorsque les cales seront éloignées d'un pied; mais plusieurs étant éloignées de 2 pieds, celles-ci ne porteroient que 110,000 liv.

228. Si l'on avoit posé les pierres des piliers de cette manière avec des cales, il y en auroit eu 56 dans chaque assise des paremens, ainsi chaque cale auroit porté la cinquante-sixième partie du poids du quart du dôme, ou $\frac{8015483}{56} = 143{,}133$ liv., tandis

(*) Journal de physique de novembre 1774.

que nous venons de voir qu'elles ne pourroient porter que 110,000 liv.; par conséquent on ne doit pas être étonné si quelqu'unes de ces pierres ont cassé, d'autant plus qu'il y a des pierres de paremens de plus de quatre pieds de longueur et que l'on met ordinairement les cales à peu de distance des extrémités. S'il n'y a pas eu plus de pierres cassées qu'il n'y en a réellement, c'est que les cales de bois ont cédé; mais si elles avoient été en fer, les pierres seroient peut-être toutes cassées et le dôme ne seroit pas moins affaissé.

229. L'on peut néanmoins, pour empêcher les tassemens, employer les cales de fer, en les mettant à peu de distance entre elles, et ayant l'attention de les placer à-peu-près les unes au-dessus des autres.

230. Je proposai à-peu-près un moyen de ce genre à la commission des inspecteurs-généraux nommés par le Ministre, en portant même les points d'appui jusqu'au centre des piliers, si on le croyoit nécessaire; il ne s'agissoit que de percer au trépan entre les joints de lit des trous de 8 à 10 lignes de diamètre sur un pied ou deux de profondeur, ou même davantage, et d'y introduire des tringles de fer de même diamètre, en les trempant dans le vinaigre pour les faire rouiller, afin que fer augmentant de volume par la rouille remplit exactement l'intervalle qui se trouve entre les pierres: ces tringles auroient eu 4 à 5 pouces de longueur de moins que le trou, afin qu'elles n'eussent pas porté près des arrêtes, et l'on auroit coulé le joint avec mortier de chaux et poussière de pierre; de cette manière toutes les pierres porteroient immédiatement les unes sur les autres, et le pilier ne pourroit plus tasser. Moyens d'employer des cales de fer.

231. Quoique ce moyen ne présentât pas beaucoup d'inconvéniens, excepté pour le panache, eu égard à la coupe qui empêcheroit de faire exactement les trous au milieu des lits, on préféra avec raison les arcs-boutans.

232. L'auteur du même projet voudroit aussi corriger le rond-point si majestueux, dit-il, dans les anciennes cathédrales, et Autres corrections proposées pour cet édifice.

qui est, suivant lui, la partie honteuse du Panthéon. Il désireroit avec raison qu'il fut terminé comme les autres nefs transversales qui produisent le plus heureux effet; l'inconvénient n'est pas moindre du côté de l'entrée, et pour corriger l'un et l'autre, il suffiroit d'élever quatre nouvelles colonnes D *d* avec leur entablement qui traverseroient les deux nefs (voyez fig. 14 et 15), et deux colonnes E, et un entre-colonnement J dans le fond; on auroit eu par-là un vestibule intérieur qui auroit fait un bel effet, et dans le fond un sanctuaire terminé par un tableau en sculpture qui auroit pu être éclairé comme le fond de la chapelle Saint-Sulpice, par la fenêtre G qui auroit été masquée.

Il auroit encore été très-avantageux que les tribunes régnassent tout à l'entour des nefs, ce qui est encore facile comme on le voit en I (fig. 14), et d'autant plusconvenable que l'on a observé les balustrades qui à présent ne servent à rien. Tous ces petits défauts font voir, que dans les ouvrages les plus parfaits il est rare qu'il n'y ait toujours quelque chose à désirer.

233. Afin d'avoir encore un objet de comparaison, je joindrai ici les estimatifs de tous ces projets.

Projet du citoyen Rondelet	63,749 liv.	
Projet du citoyen Brongniard.	86,918	
Des arcs-boutans.	98,935	156,544 liv.
Des avant corps sous le panache. .	57,609	

Projets des architectes étrangers à la commission.

Premier projet des pilastres sous le dôme	58,972 liv.	
Deuxième projet contre le dôme seulement.	177,912	699,248 liv.
Adjonction pour la simétrie. . . .	521,336	
Les arcs-boutans dans les pans coupés pour soutenir la colonnade. . . .	750,316	
Troisième projet contre le dôme. .	142,456	264,912
Adjonctions pour la simétrie . . .	122,456	
Quatrième projet contre le dôme. .	233,608	660,824
Adjonctions pour la simétrie. . . .	427,216	

234. Indépendamment des projets ci-dessus, quelques architectes ont cru le mal si considérable qu'ils se sont imaginés qu'on ne pouvoit le réparer qu'en reprenant en entier toutes les faces des piliers, ainsi que les trois colonnes qui y sont engagées et laissant seulement subsister le noyau; ils ont donné quelques détails sur les précautions qu'ils conseilloient de prendre dont il est assez inutile de faire mention.

Quelques architectes ont conseillé de refaire les piliers en entier.

Les citoyens Gérome et Nouvion ont cru même qu'il n'y avoit d'autre moyen que de reprendre sous œuvre en entier les piliers jusqu'à la naissance des panaches, et pour cet effet ils proposent d'élever tout à l'entour de ces piliers des massifs de 7 à 8 pieds d'épaisseur moyenne qui en seroient éloignés de 3 à 4 pieds et s'en rapprocheroient au niveau de l'entablement, où l'on commenceroit par les incruster, jusqu'à la partie supérieure, dans l'épaisseur des piliers par encorbellement, de telle sorte que vers le milieu de la hauteur de ces incrustemens les parties opposées de ces massifs se rapprocheroient en forme de voûte pour soutenir le dôme en entier, en ne laissant qu'une très-petite partie du noyau entr'elles; au moyen de ces massifs on démoliroit en entier les piliers, et on les reconstruiroit avec les précautions convenables.

Projet des cit. Gérome et Nouvion.

235. Il seroit sans doute difficile de faire sans risque des incrustations aussi considérables que celles qu'on propose dans la partie supérieure; il n'en coûteroit pas beaucoup plus de faire monter ces massifs jusques sous les panaches et sous les arcs-doubleaux, sous lesquels on pourroit construire des voûtes à peu de frais puisqu'elles n'auroient que 16 à 17 pieds d'ouverture et que l'on ne feroit qu'ajouter un cinquième à la hauteur, où l'on propose d'élever ces massifs; de cette manière on soutiendroit beaucoup mieux la majeure partie du poids; mais il resteroit encore tout ce que portent directement les piliers que l'on ne pourroit soutenir que par des incrustations derrière ces piliers.

On pourroit effectivement par-là changer toutes les pierres des

piliers, mais non sans risques; on pourroit même changer une partie de l'entablement, quoique avec difficulté, puisqu'on ne peut laisser d'espace pour y travailler après les massifs construits; mais l'on a toujours l'objection à faire que lorsque l'on auroit consolidé la partie inférieure, la partie supérieure vers la naissance des panaches et des arcs-doubleaux ne le seroit nullement, qu'il pourroit survenir à cet endroit les mêmes dégradations qui ont eu lieu sur les piliers, et que dans cette partie elles seroient bien plus dangereuses. D'ailleurs la dépense en est énorme puisqu'en n'admettant les massifs qu'à la hauteur indiquée par les citoyens Gérome et Nouvion, la dépense monteroit à près d'un million d'après les mêmes prix sur lesquels les autres projets ont été calculés.

Lorsque les arcs-boutans seront faits, on ne courra aucun risque à réparer les piliers et les colonnes.

236. Lorsque l'on aura soutenu le dôme en construisant des arcs-boutans ou des avant-corps, ou les uns et les autres à la fois, comme ces maçonneries ne pourront pas être sujettes à tasser par la manière dont elles seront construites, on n'aura pas beaucoup à craindre que la charge continue à faire éclater les pierres, et l'on pourra alors réparer sans risque les piliers et les colonnes.

Manière de réparer les piliers.

237. Quant aux premiers, il suffira de remplacer les pierres dont les fentes sont éloignées de moins d'un pied les unes des autres, ainsi que celles qui sont éclatées sur le devant et qui ont de larges épaufrures apparentes ou même qui sont cachées, ce que l'on reconnoît assez aisément en les frappant avec un marteau; mais il suffira de faire ces incrustations sur 5 à 6 pouces de profondeur, en observant de ne caler les pierres remplacées que sur le derrière et à plus de 2 pouces des paremens.

Manière de réparer les colonnes.

238. A l'égard des colonnes, il ne seroit pas impossible de replacer entièrement tous les tambours qui ont éclaté, en soutenant les tambours supérieurs, qui n'ont pas souffert, par des chevalemens pendant qu'on reprendroit ceux du bas; mais ce moyen de changer en entier les tambours des colonnes ne paroît

nullement nécessaire, et les réparations peuvent se faire aussi bien et beaucoup plus simplement en formant chaque tambour de colonnes de trois pierres et laissant un noyau de 2 pieds de diamètre, de sorte que les remplacemens formeroient une couronne de 8 à 9 pouces de largeur, qui seroit appliquée exactement contre ce noyau, dans lequel on introduiroit de longues cales de bois dur ou de fer, après avoir dégradé les joints pour les faire entrer à juste; l'on auroit attention au surplus de ne caler les remplacemens que sur le derrière.

Les remplacemens doivent être faits en pierre de Mont-Souris.

239. Il sera bon d'employer de la pierre de Mont-Souris pour ces remplacemens plutôt que de la pierre du fond de Bagneux, puisqu'elle éclate moins que celle-ci et qu'elle a une épaisseur double, au moyen de quoi on pourroit remplacer deux tambours à la fois. On aura attention de polir les lits au grez et de laisser un biseau de 2 à 3 pouces pour que la pierre ne porte nullement sur le devant.

Moyen de décharger les colonnes.

240. Comme ces colonnes seront encore fort chargées, il est bien important d'empêcher qu'elles ne portent sur leurs arrêtes, et pour cet effet il sera convenable de scier les joints des arcs-doubleaux des nefs par encorbellemens en commençant un peu au-dessus des reins et finissant sur la corniche en donnant au premier trait de scie un pouce de profondeur et 5 à 6 pouces au dernier, de cette manière toute la charge se reportera sur le centre et sur le derrière des colonnes, et ne fatiguera plus autant les paremens. On fera bien aussi de scier les joints des colonnes sur 5 à 6 pouces de profondeur au-dessous des chapiteaux et jusqu'à la hauteur de l'imposte, en faisant entrer au-delà des parties sciées des cales de matières dures pour que la pierre puisse porter, attendu que, malgré les arcs-boutans, le poids qui est au-dessus ne laisse pas que d'être considérable; enfin, l'on ne doit négliger aucune des précautions qui tendront à empêcher un tassement qui a produit tant de mal.

Résumé général.

241. D'après les dernières expériences qui ont démontré que

depuis que l'on ne travaille plus à réparer les piliers, il ne s'est manifesté aucune nouvelle fente, ni aucun nouvel éclat aux piliers, il paroît hors de doute que tant qu'on laissera agir le poids seul du dôme, qui n'est qu'une force morte, les maçonneries ne tasseront pas ; mais il y a la plus grande probabilité que dès que l'on voudra faire des arrachemens au marteau, on convertira cette force morte en force vive et que les dégradations continueront.

242. On ne doit donc proposer aucune construction ou réparation qui puissent déterminer un nouveau tassement.

243. Comme on ne peut cependant pas changer les pierres fendues ou éclatées, et refaire la plus grande partie des colonnes sans coups de marteau, il faut donc avant que de faire ces réparations, commencer par étaier. Tont le monde est d'accord là-dessus.

244. Les ceintres proposés par les architectes à cet effet sont visiblement insuffisans puisqu'ils ne soutiendroient au plus que la douzième partie du poids.

245. Les arcs-boutans proposés par les ingénieurs en soutiendroient la plus grande partie, et seroient même capables de soutenir la totalité; ils sont donc bien préférables sur-tout si on peut les construire sans coups de marteau.

246. Les moyens proposés par la scie cilindrique et par celle en plateau pouvant former toutes les entailles sans frapper aucun coup, démontrent invinciblement que cette espèce d'étaiement peut se faire sans risque.

247. Ces étaiemens étant permanens, remplaceront donc avec beaucoup davantage les murs plaqués des architectes qui n'empêcheroient pas, comme ces arcs-boutans, le poids du dôme d'agir sur l'entablement et dans la partie supérieure, et d'y causer, même après leurs constructions, des dégradations pareilles à celles qui existent actuellement sur ces piliers.

248. D'ailleurs ces murs plaqués ne pouvant être construits sans

sans exciter une force vive en formant des incrustations indispensables dans les piliers, on ne remédieroit donc à rien; tandis que l'on travailleroit d'un côté, il se feroit des dégradations de l'autre, ce que l'on ne peut pas éprouver par les arcs-boutans.

249. Les arcs-boutans embrassant la totalité du pilier et soutenant même la poussée des arcs-doubleaux contre lesquels ils s'appuient, supportent non-seulement la charge qui est sur les piliers, mais encore celle qui est sur les arcs-doubleaux, et par conséquent la totalité du poids du dôme; ainsi il n'y a pas de nécessité à chercher un autre point d'appui à la partie portée par les panaches.

250. Cependant comme c'est véritablement sous ces panaches que se trouve le centre de gravité du poids du dôme, et que les arcs-boutans soutiennent moins directement cette partie que les autres, on peut construire sous ces panaches quatre massifs H fig. 1 en avant-corps qui seront placés directement sous les centres de gravité des panaches.

251. Ces massifs, loin de gâter la décoration, comme tous les projets que l'on a proposés, y ajouteront encore en décorant la partie qui doit l'être davantage et en supprimant les pilastres pliés qui ne sont pas effectivement bien d'accord avec le reste de l'architecture. Ils serviront encore à caractériser davantage la nouvelle destination de cet édifice, pouvant être employés à des cénotaphes dressés à la mémoire des grands hommes.

252. La partie appliquée au panache pouvant avoir une grande largeur, portera le poids beaucoup plus puissamment que l'obélisque du citoyen Brongniard, qui feroit paroître toute l'architecture petite et en détruiroit absolument le grand effet.

253. Les murs plaqués entre les colonnes qui ôteroient la simétrie de l'édifice seroient d'un foible secours, et montreroient en outre des étaies permanentes; ils rappeleroient à jamais un vice de construction dont il est certainement inutile de perpétuer la mémoire, quand ce ne seroit que pour ne pas obscurcir la

gloire de l'auteur de cet édifice, à qui les artistes ont, sans contredit, obligation pour leur avoir montré un vaste champ d'exercer leur génie, en leur apprenant à soutenir de grandes masses sur des points d'appui beaucoup moindres que ceux que l'on avoit employés jusqu'alors, sur-tout lorsqu'on évitera ce genre vicieux de construction qu'il a employé en se conformant inconsidérement aux usages reçus.

254. Enfin, on pense que l'on peut employer avec avantage les deux moyens, et quoiqu'il paroisse que les arcs-boutans puissent suffire, on ne peut trop prendre de précautions pour s'assurer de la solidité d'un édifice aussi important que celui-ci, surtout lorsque l'un de ces moyens peut s'employer sans paroître au dedans, et que l'autre ne peut qu'ajouter à la décoration dans la partie qui en avoit le plus besoin.

CHAPITRE IV.

Sur les voûtes sphériques.

---

255. Le citoyen Rondelet a examiné (pages 60, 61 et 62 de son mémoire) la différence de la poussée des voûtes sphériques avec celle des voûtes en berceau, et ses raisonnemens le conduisent à conclure que les premières n'ont aucune poussée, et que loin de tendre à écarter les murs circulaires sur lesquels elles reposent, elles les affermissent par leur poids; d'où il suit, dit-il, que l'on peut se dispenser de donner aux murs qui supportent les voûtes des coupoles une épaisseur plus forte que celle qu'elles ont par le bas, sur-tout lorsqu'elles vont en diminuant d'épaisseur.

256. Comme il seroit dangereux de ne pas répondre à une pareille assertion qui pourroit induire en erreur quelques architectes par l'appareil d'une démonstration qu'il a cru en donner, et qu'il prétend avoir étayée d'une expérience, il m'a paru nécessaire d'entrer dans quelques détails à ce sujet.

257. La théorie du citoyen Rondelet consiste à dire que si après avoir mené (fig. 22) deux lignes FD, FB, l'une tangente au sommet de la voûte et l'autre à la naissance, on tire une ligne CF du centre à la rencontre de ces deux lignes, elle séparera les parties inférieures qui tendent à tomber en dedans de celles qui agissent en sens contraire.

L'on observe d'abord que ceci n'est pas juste, car toutes les parties d'une voûte, excepté celles du bas que le frottement retient sur un plan incliné d'environ 18 degrés, tendent à tomber en dedans.

Il dit ensuite que si par le point N, où la ligne inclinée rencontre la voûte, on tire une horizontale LNJ, la partie LN exprimera l'effort de la partie supérieure, et la partie NJ celui de la partie inférieure qui lui résiste, en tendant à tourner sur le point B, de sorte qu'en faisant abstraction des pieds-droits, l'effort de la partie supérieure sera exprimé par le produit de son poids par LN, et l'effort de la partie inférieure par son poids multiplié par JN, d'où il suit que si les pieds-droits étoient en raison inverse de LN et de JN, les produits étant égaux, il n'y auroit pas de poussée, et c'est, dit-il, précisement ce qui arrive dans les voûtes sphériques.

Tout ce qu'il y a de vrai dans cet exposé, c'est que si l'on eût pris l'arc moyen dng, qui partage la voûte en deux parties égales et concentriques, au lieu de l'arc DNB, et la ligne inl au lieu de JNL, alors les cubes des deux parties de la voûte auroient été entre eux dans le rapport de in à nl, mais l'action que ces deux parties exercent l'une contre l'autre, n'est pas, à beaucoup près, dans les mêmes proportions que leur poids.

Pour que ces voûtes ne poussassent, pas il faudroit que leurs bras de levier fussent en raison réciproque de cette action, et c'est ce qui n'est pas, comme je vais le démontrer.

258. Après avoir décrit l'arc dng, cherchez le centre de gravité E de la partie inférieure; abaissez la verticale EG, tirez ND' perpendiculaire sur NC, et du point A de la naissance de l'extrados, tirez AD' perpendiculaire sur ND'; cette ligne AD' sera le levier de la puissance agissante *d*DNn' que je nomme *mm*, et AG celui de la puissance résistante n'NBA que je nomme *nn*; je nomme aussi AD' $= a$, et AG $= b$, en supposant, comme on l'a fait ici, la rupture à la hauteur de 45°, et que la partie supérieure glisse comme un coin sur le point N : on sait que l'action de cette partie supérieure sur le point N $= \frac{mm \times CN}{NL}$ ou environ $= \frac{7\,mm}{5}$ puisque NL : CN :: 5 : 7. Son momentum ou son énergie est $\frac{7\,mm}{5} \times$ AD : l'éner-

gie de la partie résistante est $nn \times AG$, de sorte que pour que ces deux puissances fussent en équilibre, il faudroit que $\frac{7mm}{5} \times AD = nn \times AG$, ou que $7amm = 5bnn$ et comme $mm : nn :: DL : LC$ ou $:: 2 : 5$. On aura $5mm = 2nn$ ou $mm = \frac{2nn}{5}$, en substituant cette valeur de mm dans l'équation ci-dessus, on aura $\frac{14ann}{5} = 5bnn$ ou $14a = 25b$ ou $a : b :: 25 : 14$, c'est-à-dire, que ces deux leviers seroient entre eux dans le rapport constant de 25 à 14, ce qui est impossible, puisqu'il est évident qu'en augmentant l'épaisseur de la voûte, le levier AD diminue, tandis que le levier AG augmente.

259. Si on double par exemple cette épaisseur en décrivant l'arc HJ*a*, que du centre de gravité *e* on abaisse la verticale eg et que l'on tire ad perpendiculaire sur ND, l'on a évidemment ad plus petit que AD, et ag plus grand que AG, ce qui fait voir clairement qu'il est absolument faux de dire que les voûtes sphériques n'ont aucune poussée.

260. Le rapport de l'énergie de la partie qui pousse à l'énergie de la partie qui résiste dépend beaucoup de l'épaisseur de la voûte dont le citoyen Rondelet ne fait cependant pas mention ; elle dépend aussi principalement de la hauteur des pieds-droits dont il ne parle pas davantage, et d'ailleurs ce n'est pas sur le point B de l'intrados que la partie inférieure de la voûte doit tourner, mais sur l'extrémité A de l'extrados.

261. Cet architecte rapporte une expérience qu'il a faite sur un modèle de voûte sphérique divisée en huit parties égales par des plans verticaux, et chaque partie subdivisée en deux autres par un joint à la hauteur de 45°. Il dit que cette voûte, élevée sur un mur circulaire divisé en huit parties correspondantes à celles de la voûte, s'est soutenue sans disjonction, et même qu'en substituant une colonne à chacune de ces parties de murs, en faisant cependant répondre les joints sur le milieu des colonnes, cette voûte s'est encore soutenue.

262. J'ai vu le modèle en question, et j'observerai d'abord que

la partie inférieure de la voûte est bien divisée en huit parties; mais que la partie supérieure n'est divisée qu'en quatre. Il résulte de-là que chaque voussoir supérieur en pousse deux de la partie inférieure, et que par ce moyen le centre de gravité de chaque quart du mur est fort rapproché du côté de l'intérieur, ce qui donne beaucoup d'avantage à la puissance résistante; mais ce qu'il faut principalement considérer, c'est qu'en mettant les joints de la voûte sur le millieu des colonnes, il faudroit pour que la poussée se fit sentir, que les colonnes fussent divisées dans toute leur hauteur par un plan vertical, ou qu'au lieu d'être placées sous les joints, elles fussent placées sous le milieu des voussoirs.

263. L'on sait bien que lorsqu'une plate-bande est d'une pièce, elle n'a plus de poussée, et chaque huitième de voûte fait ici l'effet d'une plate-bande d'une seule pièce; il faut encore observer que dans cette expérience la rupture de la voûte est supposée s'être formée à l'angle de 45 degrés, et à cette hauteur la partie supérieure est beaucoup trop foible, par rapport à la partie inférieure pour opérer une poussée importante, par conséquent il est aisé de voir que cette expérience ne peut rien prouver.

264. Les voûtes sphériques poussent moins sans doute que les voûtes cilindriques, mais il est très-certain qu'elles poussent, et qu'il n'y a aucune voûte composée de beaucoup de pierres qui ne pousse le pied-droit ainsi que sa partie inférieure.

265. Dans les voûtes cilindriques le développement de la partie supérieure est un parallélograme, qui, en supposant la rupture à la hauteur de 45 degrés, est égal au développement de la partie inférieure, tandis que dans les voûtes sphériques cette partie supérieure qui pousse est une espèce de triangle qui n'est qu'environ les deux cinquièmes de la partie inférieure; c'est ce qui avoit fait dire à Frezier que les voûtes sphériques n'avoient pas la moitié autant de poussée que les voûtes en berceau, et qu'en ne donnant a leur pied-droit, que la moitié de l'épaisseur

qui est convenable à celles-ci, il seroit encore plus fort qu'il n'est nécessaire pour les mettre en équilibre avec la pousée. On verra bientôt que cette assertion n'est pas juste.

266. J'observe d'abord que la théorie de l'académicien de Lahire que l'on à suivie jusqu'à présent pour calculer l'épaisseur des pieds-droits des voûtes n'est pas exacte. Il a supposé que la rupture se faisoit à la hauteur de 45 degrés, et c'est ce qui n'arrive pas toujours, à beaucoup près a toutes sortes de voûtes; mais ce qui change presque totalement le résultat des calculs faits d'après son hypothèse, c'est qu'il suppose que la partie supérieure de la voûte ne se divise pas, qu'elle agit comme un coin et glisse contre les reins, et c'est ce qui n'est peut-être jamais arrivé. La voûte se fend toujours vers la clef, et se divise avec ses pieds-droits au moins en quatre parties aux points DEM' ; si l'on tire les lignes KD, DE, EM', M' K', on peut les considérer comme quatre leviers joints à charnière aux points EDM' qui ont leurs points d'appui aux points KK', extrémité de la fondation de ces pieds-droits; l'on doit considérer les leviers supérieurs ED, EM' chargés chacun du poids des parties supérieures de la voûte vis-à-vis leur centre de gravité m *m*, et les leviers inférieurs chargés aussi chacun du poids de la partie inférieure vis-à-vis les centres de gravité n *n*, et du poids des pieds-droits aux points LL'. C'est certainement de cette manière qu'il faut calculer cette poussée des voûtes et d'aprés plusieurs expériences que j'ai faites en grand et en petit, j'ai toujours reconnu qu'une voûte ne pouvoit jamais tomber qu'elle ne fut séparée en quatre parties principales, au moins, et souvent en cinq. La clef en faisant une partie essentielle, j'ai calculé d'après ce principe l'épaisseur que doivent avoir les voûtes en berceau, en plein ceintre, ou surbaissées au tiers et au quart, en prenant pour toutes le point de rupture à l'endroit le plus désavantageux, c'est à dire à celui qui demande le plus d'épaisseur afin de ne rien risquer dans l'usage.

267. Comme les tables qui ont été faites d'après l'hypothèse

de l'académicien de la Hire, et qui se trouvent dans le cours d'architecture de Blondel, sont suivies par les ingénieurs, et qu'elles peuvent induire en de grandes erreurs en ce qu'elles donnent des épaisseurs trop fortes pour de petites voûtes, et trop foibles pour de grandes voûtes, j'ai calculé de nouvelles tables, tant pour les voûtes en plein ceintre que pour les voûtes surbaissées au tiers et au quart, et je les joindrai à la fin de ce mémoire. On peut s'en servir avec d'autant plus de confiance que la puissance agissante a été supposée par-tout d'un quart plus forte qu'elle n'est réellement, et que, malgré la longueur des calculs, ils ont été faits avec le plus grand soin. Ces calculs sont faits pour des voûtes terminées en plate-forme, afin qu'elles servent principalement pour les ponts, et que d'ailleurs on fait peu de voûtes que l'on n'en remplisse les reins. Je n'ai point fait de tables complettes pour les voûtes sphériques, ou pour des dômes, parce que la forme de ces voûtes et la charge des pieds-droits varie considérablement; mais d'après celle que je donnerai pour les voûtes sphériques, depuis 12 pieds jusqu'à 96 pieds de diamètre, et sur-tout d'après le dôme de Saint-Pierre de Rome, que je calculerai avec quelques détails, il sera aisé de trouver l'épaisseur des pieds-droits de toutes les voûtes de ce genre.

La rupture ne se fait pas à la hauteur de 45 degrés.

268. La rupture se fait effectivement dans le cas le plus désavantageux à la hauteur de 45° pour les voûtes en berceau et en plein ceintre; mais elle se fait bien différemment dans les voûtes sphériques, elle se trouve beaucoup plus basse. Je donne ci-dessous le calcul complet pour une voûte sphérique extradossée de 2 pieds d'épaisseur, et de 48 pieds de diamètre sur 24 pieds de hauteur de pieds-droits, et je trouve que l'épaisseur de ces pieds-droits doit être d'autant plus forte que l'on suppose la rupture plus basse, mais seulement jusqu'à la hauteur d'environ 15 degrés au-dessus des naissances, où se trouve dans l'exemple que j'ai choisi le cas le plus désavantageux où se puisse faire cette rupture; car si l'épaisseur de la voûte eût été plus ou moins grande, ou

les

les pieds-droits plus ou moins élevés, ce point eût été un peu différent, mais il ne s'éloigneroit pas beaucoup du quart de la hauteur de la voûte prise sur son épaisseur moyenne.

Calcul de la poussée d'une voûte sphérique extradossée de 48 pieds de diamètre, 2 pieds d'épaisseur sur 24 pieds de hauteur de pieds-droits, en supposant la rupture à 45 degrés de hauteur.

269. Les grands dômes étant ordinairement percés de 12 ou 16 fenêtres, je supposerai cette voûte divisée en seize parties égales par des cercles verticaux, parce que si les murs n'étoient pas assez épais, avant que d'être renversés ils se fendroient nécessairement vis-à-vis de ces fenêtres, puisque c'est la partie la plus foible. Je supposerai dans le calcul que le plein des murs est des $\frac{3}{4}$ de la circonférence intérieure et que leur largeur est uniforme; comme cette supposition aura lieu dans toutes les hypothèses de la rupture de la voûte, on aura toujours par-là le rapport des épaisseurs. Calcul de la poussée des voûtes sphériques.

270. Soit fig. 20 le profil EMNB d'une voûte extradossée de 48 pieds de diamètre et de 2 pieds d'épaisseur, supposant que la rupture se fasse en D à 45 degrés, je tire les lignes CD, DQ, DR; je cherche ensuite le cercle Nn Mm, qui partage la sphère en deux parties égales et concentriques; son diamètre sera 25,020; je tire la ligne fh tangente au sommet de l'arc MN, et l'horizontale dq qui le partage en deux parties égales; je tire ensuite l'horizontale MG également distante des lignes fh et dq, et n'l également distante de DQ et bC. Le plan qui passeroit par la première partagera la partie supérieure de la voûte en deux parties égales, et ce sera sur ces lignes MG, n'l que se trouvera le centre de gravité de chacune de ces parties de voûte que l'on trouve en m et n, de sorte que mG = 12,948 et n'l =

23,246 ; nommant la partie supérieure de la voûte mm, et la partie inférieure nn, on aura $mm = 144{,}054$ et $nn = 347{,}769$.

Je tire les lignes DE, DK, mP, nS. L'on trouvera DQ = CQ = 16,970, AD = 7,030, DJ = 17,691, NJ = 23,404, mG = 12,948, EQ = 9,030, DP = 4,022, BS = 0 754. Il faut considérer ces lignes DE, DK comme deux leviers auxquels seroit appliqué le poids de chaque partie de la voûte dans les points où les verticales MP, NS les coupent ; prenant le point E pour point d'appui la puissance appliquée horizontalement en D que je nomme aa, et qui retiendroit le pied du levier DE suivant la direction DQ seroit $= \frac{mm \times EV}{EQ} = \frac{144054}{9030} \times 12{,}948 = 206{,}557$; c'est-là la puissance agissante qui tend à pousser le levier DK, qui a son point d'appui en K suivant la direction DU ; son bras de levier $KU = 24 + 16{,}970 = 40{,}970$, son énergie sera $206{,}557 \times 40{,}970 = 8{,}462{,}640$.

Prenant à présent le point D pour point d'appui, on aura la puissance appliquée en E suivant la direction verticale, et que je nomme $ee = \frac{mm \times DP}{DQ} = \frac{144054}{16970} \times 4{,}022 = 34{,}141$. la charge sur le point D est $nn - ee = 144{,}054 - 34{,}141 = 109{,}913$, c'est l'une des puissances résistantes son bras de levier est $KR = y + 7{,}030$, son énergie sera $109{,}913 \times y + 7{,}030 = 109{,}913\, y + 772{,}688$.

La partie inférieure de la voûte $nn = 347{,}769$ forme la deuxième puissance résistante, son bras de levier $KS = y + 0{,}754$ son énergie sera $347{,}769 \times y + 0{,}754 = 347{,}769\, y + 262{,}218$.

La troisième puissance résistante est le mur Kb, dont il ne faut prendre que les $\frac{3}{4}$ à cause des vuides, et l'on aura $\frac{3}{4}\, 9{,}429 \times 24 = 175{,}740\, y$, son bras de levier est $\frac{1}{2}$ y, son énergie sera donc $87{,}870\, yy$.

271. L'on aura enfin, l'équation $8{,}462{,}640 = 109{,}910\, y + 772{,}688 + 347{,}769\, y + 262{,}217 + 87{,}870\, yy$, qui se réduit à $87{,}870\, yy + 457{,}682\, y = 7{,}427{,}735$; et divisant par 87,870

on aura $yy + 5,208\,y = 84,530$, d'où l'on tire $y + 2,604 = \sqrt{84,530 + 2,604^2} = 6,952$, qui est l'épaisseur BK que l'on cherche.

272. J'ai fait un calcul à-peu-près pareil en supposant la rupture à 20 degrés (fig. 21), et je trouve que l'épaisseur devroit être alors de 8,339, qui est beaucoup plus grande.

J'ai ensuite supposé la rupture à 15 degrés (fig. 21), et j'ai trouvé que l'épaisseur devroit être de 8,949, qui est encore plus grande.

De sorte que les épaisseurs augmentent d'autant plus que l'on suppose la rupture plus basse, ce qui est assez naturel puisque le cube de la puissance agissante augmente et que celui de la puissance résistante diminue.

Mais supposant la rupture à 10 degrés l'on trouve que l'épaisseur devient 8,889, c'est-à-dire, qu'elle diminue.

273. Je la suppose encore aux naissances, et je ne la trouve plus que 8,644, ce qui provient de ce que le bras de levier de la puissance agissante diminue plus que le cube de cette puissance n'augmente, d'où l'on doit conclure que c'est à-peu-près vers la hauteur de l'arc de 15 degrés que la rupture des voûtes sphériques doit se faire lorsque l'épaisseur des pieds-droits n'est pas assez grande pour soutenir la poussée, et par conséquent que c'est en supposant la rupture des voûtes sphériques à 15 degrés que l'on doit faire le calcul de la poussée de ces sortes de voûtes, et non pas en la supposant à 45 degrés, qui n'est le cas le plus désavantageux que pour les voûtes en berceau et en plein ceintre.

274. J'ai aussi calculé l'épaisseur que doivent avoir les pieds-droits d'une voûte en berceau extradossée, et des mêmes dimensions que la voûte sphérique et avec même hauteur de pieds-droits, et je trouve que l'épaisseur des pieds-droits, en supposant les mêmes vuides de $\frac{1}{4}$, étoit 10 pieds 368.

Je donne ici le tableau de ces épaisseurs d'après les diverses hypothèses ci-dessus.

Voûtes en berceau fendues à 45° l'épaisseur est	10 pi.	368
Voûte sphérique fendue à 45° elle est de	6	952
Idem fendue à 20° elle est de	8	339
Idem fendue à 15° elle est de	8	949
Idem fendue à 10° elle est de	8	889
Idem fendue aux naissances elle est de.	8	644

Il s'en faut de beaucoup que la poussée des voûtes sphériques soit nulle.

275. L'on voit par-là qu'il s'en faut de beaucoup que la poussée des voûtes sphériques soit nulle, ou même peu de chose, puisque dans l'exemple ci-dessus l'épaisseur des pieds-droits ne diffère de celle des voûtes en berceau que des $\frac{1}{7}$ au lieu de la moitié, sur quoi l'on avoit compté jusqu'à présent. Si on suppose la voûte divisée en plus ou moins de seize parties, et les vuides différens du quart du cube des murs, on trouvera d'autres résultats, mais qui ne seront cependant pas très-différens de ceux ci-dessus.

Les voûtes sphériques risquent beaucoup moins de tomber que les voûtes en berceau.

276. Lorsque les pieds-droits des voûtes sphériques ou sphéroïdes ne sont pas percés de fenêtres, elles risquent peu de pousser les pieds-droits puisqu'elles ne peuvent les renverser que lorsque la voûte ainsi que les pieds-droits se seront fendus verticalement, et la ténacité seule des mortiers ainsi que les liaisons des matériaux qui composent la maçonnerie, suffisent souvent pour empêcher ces fentes verticales, quand même les pieds-droits seroient un peu foibles; ce qui n'arrive pas aux voûtes en berceau sur-tout lorsqu'elles ne sont pas terminées ni liées à leurs extrémités par des gros murs, ou lorsqu'elles sont fort longues; on peut même pour les voûtes sphériques ou sphéroïdes cramponner toutes les pierres et placer dans l'intérieur de la maçonnerie ou au dehors des cercles de fer qui empêchent jusqu'à un certain point la disjonction des murs, de sorte que l'on a beaucoup plus de moyens de résister à la poussée des voûtes sphériques qu'à celles en berceau.

Cependant ces disjonctions verticales peuvent survenir de différentes causes, telles qu'une inégalité dans la résistance du terrein des fondations ou dans le tassement, ou par des causes accidentelles,

telles qu'un tremblement de terre, des coups de tonnerre, etc. On prétend même que l'explosion de poudre arrivée au château de Grenelle, a pu contribuer aux dégradations des piliers du dôme du Panthéon. Ce qu'il y a de certain, c'est que la commotion s'y est fait sentir très-sensiblement; il ne faut donc jamais négliger de donner aux murs qui doivent soutenir des voûtes sphériques, les épaisseurs qu'elles devroient avoir; en les supposant fendues du haut en bas par différentes causes accidentelles.

277. Nous avons un exemple fameux de l'effet de la poussée des grandes voûtes sphéroïdes dans le dôme de Saint-Pierre de Rome; je donnerai ici la description des dégradations qui y sont survenues, ainsi que des remèdes qu'on y a apportés, tant pour faire voir l'effet de la poussée que pour comparer les dégradations de ce dôme avec celles du Panthéon, quoiqu'elles ne proviennent pas de la même cause.

Peu de tems après la construction de ce dôme, on commença à s'appercevoir de quelques fentes dans son pourtour; mais quarante à cinquante ans après, elles étoient augmentées assez considérablement pour donner de grandes inquiétudes sur sa solidité; entre plusieurs lézardes il y en avoit une de 8 lignes de largeur, qui, soixante ans après, avoit augmentée de 33 lignes.

278. En 1743, les dégradations étoient devenues si considérables que l'on crut ne pouvoir plus retarder d'y porter remède. La tour du dôme étoit lézardée verticalement en beaucoup d'endroits, sur-tout au-dessus des fenêtres; elle étoit fendue horizontalement en CCC à l'intérieur (fig. 23) sur les pilastres. Les contre-forts étoient tous séparés en n de la tour du dôme, ainsi que le grand socle AF sur lequel ils sont appuyés, et qui étoit fendu verticalement en L et horizontalement en dF dans tout le pourtour intérieur du corridor sur la base. Il y avoit une quarantaine de grandes lézardes mm dans chacune des deux voûtes, et beaucoup plus sur le socle intérieur en PQ vers les naissances, où s'étoit fait le plus grand effet. La somme des largeurs de ces

Etat des dégradations du dôme de Saint-Pierre de Rome, en 1743.

lézardes verticales étoit à cet endroit de 16 à 17 pouces, et les pilastres intérieurs CC avoient un talus de 2 pouces ½ moyennement. Ces deux effets démontrent sensiblement que le dôme s'étoit élargi à cet endroit d'environ 5 pouces; il ne paroît donc pas douteux que les voûtes n'aient poussé les murs; tout l'édifice a souffert considérablement, et ne subsisteroit peut-être plus à présent si l'on n'eût pas cherché à arrêter le mal.

Mais l'a-t-on arrêté véritablement ce mal? C'est ce que j'examinerai bientôt.

On n'a pas été d'accord sur la cause de ces dégradations.

279. Quoique tous les désastres qui sont arrivés au dôme de Saint-Pierre paroissent démontrer que la poussée des voûtes en est la principale cause; cependant on n'a pas été et l'on n'est peut-être pas encore bien d'accord sur cette cause; quelques personnes ont attribué tous ces effets 1°. à la construction des piliers qui ont été augmentés dans tout leur pourtour à différentes reprises, et qui sont construits avec des matériaux de diverses espèces, en briques et en pierres de taille, et principalement en blocage de moëlons, dont le tassement n'a pas pu être uniforme. 2°. A l'inégalité de résistance du sol sur lequel ils ont été établi. 3°. A ce que le massif des piliers ne s'étend pas jusqu'au-dessus des panaches. 4°. A ce que les voûtes du dôme ont été faites trop précipitamment. 5°. A ce que les travaux de la nef ont éprouvé des échecs qui ont pu se communiquer au dôme. 6°. Enfin, à des tremblemens de terre, à des coups de tonnerre qui l'ont attaqué plusieurs fois. On a même été jusqu'à nier que la poussée des voûtes eût contribué en aucune manière à ces dégradations, cependant c'est à cette seule cause que les mathématiciens Boscowich, Jacquier et Leseur, qui furent consultés, en 1743, sur les moyens d'arrêter ces dégradations, attribuent les effets que j'ai décris d'après eux, et il ne faut que réfléchir sur le rapport très-détaillé qu'ils en ont fait pour en être absolument convaincu.

280. Il n'est pas douteux qu'il ne se soit fait un tassement

assez considérable dans les piliers; mais ces piliers ayant été élevés plus de quarante ans avant la tour du dôme, et la voûte n'ayant été construite que trente ans après cette tour, le tassement étoit sans doute fini alors, et s'il y en a eu depuis, il a dû être uniforme; car l'on ne s'est apperçu que d'une seule disjonction peu sensible dans les grands arcs, et par conséquent le dôme a dû descendre uniformement.

281. Il peut se faire que les tremblemens de terre arrivés au commencement du siècle, et les coups de tonnerre dont on dit que le dôme a été attaqué plusieurs fois, aient précipité l'ouverture des fentes verticales par la désunion des mortiers, et que par cette cause les contreforts se soient fendus du haut en bas dans leur partie foible, et cet effet une fois produit, les murs n'étoient assurément plus assez épais pour soutenir l'effort de la poussée de la voûte, comme je le démontrerai ci après.

282. L'on remarque principalement dans la description qu'ont faite les mathématiciens, que le plus grand effet des fentes et crevasses s'est fait dans le socle au-dessous de la voûte en D, et je viens de démontrer que c'est effectivement près de-là que doit se faire la rupture des voûtes sphériques, lorsque les murs ne sont pas assez épais pour résister à leurs poussées, et si elle s'est faite au-dessous même des naissances au dôme de Saint-Pierre, c'est parce que c'est-là où se trouve véritablement la partie la plus foible du mur à cause des arcades qui y sont renfoncées de 2 pieds, ce qui en diminue l'épaisseur en cette partie de près de $\frac{1}{7}$.

Le plus grand effet a eu lieu vers les naissances.

283. La rupture s'étant faite d'abord en cet endroit, le poids a dû se porter sur la partie supérieure des contreforts, qui, n'ayant pas trois pieds d'épaisseur dans la moitié de leur longueur, se sont fendus d'autant plus facilement du haut en bas que dans la partie inférieure L il y a des portes fort élevées.

284. Le poids des contreforts en s'appuyant sur le socle qui leur sert de base l'a détaché du corps du mur, dont il étoit déja séparé par un corridor *f* large et élevé, qui règne dans tout le

pourtour, ce qui a été si sensible qu'il s'est fait dans cē corridor du côté du mur intérieur une fente horizontale et continue en d, qui étoit si peu serrée que l'on enlevoit aisément les matériaux à la main; alors le point d'appui, au lieu d'être en F, a dû se trouver en f, ou plutôt les disjonctions horizontales qui règnent dans tout le pourtour entre les fenêtres du dôme dans les parties CCC, qui sont les moins solides, font voir que ce point d'appui a dû aussi se reporter vers I, à-peu-près vers la moitié de la hauteur du tambour; il résulte de ce nouveau point d'appui que non-seulement le cube de la puissance résistante est diminué, mais que son bras de levier est réduit à moins de moitié.

285. Il s'est encore fait des disjonctions considérables en e au pied de la lanterne que l'on peut considérer comme la clef de la voûte du dôme, et c'est encore un des effets qui arrivent à toutes les voûtes dont la poussée surpasse la résistance; elle se fendent toutes aux environs de la clef.

286. Pour prouver encore plus clairement que la poussée des voûtes a été la principale cause des disjonctions et dégradations qui sont arrivées à ce dôme, je vais, d'après les principes que j'ai établis (266), calculer la poussée de ces voûtes, soit lorsque les contreforts étoient adhérens aux murs, soit lorsqu'ils en ont été séparés.

Poids du dôme de St.-Pierre de Rome.

287. J'ai d'abord toisé toutes les parties du dôme sur les dessins de l'architecte Dumont, qui ont été gravés dans le plus grand détail, j'en ai calculé la pesanteur, comme on le voit ci-contre. En comparant cette table avec celle du poids des parties du dôme du Panthéon, on remarque qu'à celui-ci le poids des voûtes n'est que de 4,016,923 liv., et que le poids du tambour, jusque au-dessous de l'entablement, est de 14,861,697 liv.; ainsi, le rapport est :: 27 : 100, au lieu qu'à Saint-Pierre de Rome les voûtes pèsent 49,517,383 liv., et le tambour et socle 73,458,074 liv., ce qui établit le rapport :: 67 : 100, d'où il suit de-là que le poids qui constitue la puissance agissante est au second deux fois et demi plus forte qu'au premier.

CUBE

CUBE ET POIDS DES DIFFÉRENTES PARTIES DU DOME.

	CUBE.	POIDS.	DISTANCE du centre de gravité à l'axe.	Le seizième du poids du dôme.
	pi.	liv.		
Les fers de la lanterne	13¼	7.543		167.166
La lanterne	21.509	2.667.116		
Les voûtes	334.746	41.508.504		
Les cercles de fer	862	500.000		3.552.670
La couverture en plomb	520	431.600		
La moitié du stilobate	35.505	4.402.620	pi.	
TOTAL	393.155¼	49.517 383	61.37	
Le tambour et moitié des contreforts	433.983	53.825.898	71.78	3.364.118
Soubassement extérieur et l'autre moitié des contreforts	158.328	19.632.176	84.25	1.227.011
TOTAUX	592.311	73.458.074		4.591.129

288. Après avoir cherché le centre de gravité des puissances agissantes provenant des voûtes que j'ai trouvé en M (fig. 23), et celui des puissances résistantes en N' et tiré les verticales MR, NG, EQ, UF, et les horizontales EV, DU, j'ai trouvé (287) que le seizième du poids de la lanterne étoit = 167,166 liv., et que le seizième du poids des voûtes jusqu'à la rupture sur le stilobate = 3,552,670 liv. Je nomme *m m* cette puissance agissante = 3,552,670. Le seizième du poids de la tour, des contreforts et du socle est de 4,591,137, que je nomme *n n*, c'est la puissance résistante; l'on trouvera EV = ML = 35,800, PD = 10,200, GN = 18,660, BG = 9,800, DU = 28,500, EQ = 78, UF = 84,400, DQ = 46,000, BF = 28,500.

Centre de gravité des puissances agissantes et résistantes.

Calcul de la poussée des voûtes de ce dôme.

289. Le poids de la lanterne, en appuyant sur le point E, pousse le levier ED, en faisant soulever le poids M que je suppose attaché en R et faisant tourner le levier DF sur le point d'appui F, ce qu'il ne peut faire sans soulever le poids N, qu'il faut supposer attaché en t. Le poids M produit le même effet; le poids de la lanterne agit suivant la direction ED, qui se décompose en deux forces DV et DQ; la première DV est égale au poids de la lanterne $=$ 167,166, et agissant verticalement sur le point D, tend à consolider le pied-droit, et agit à l'extrémité du levier BF $=$ 28,500, ainsi son énergie sera 167,166 $\times$ 28,500 $=$ 4,764,231, c'est une puissance résistante; la seconde DQ tend à pousser le point D horizontalement de D en U, et cette puissance que je nommerai *qq* : 167,166 :: DQ : DV, ce qui donne *qq* $= \frac{167166}{78} \times 46 =$ 98,585, son bras de levier est FU $=$ 84,400, son énergie sera donc 98,586 $\times$ 84,400 $=$ 83,205,740, c'est une puissance agissante.

290. Le poids M $=$ *mm*, supposé attaché au point R du levier DE, feroit reculer le point D si une puissance que je nomme *aa* ne le tiroit pas de D en P; alors, prenant le point d'appui de ce levier en E, cette puissance et ce poids seront entre eux en raison réciproque des perpendiculaires EV, EQ tirées du point d'appui E sur leur direction, on aura donc *aa* : *mm* :: 35,800 : 78, ce qui donne *aa* $=$ 3,552,,670 $\times$ 35,800 $=$ 1,630,584; c'est une autre puissance qui agit aussi à l'extrémité du levier FU $=$ 84,400, ainsi son énergie sera 1,630,584 $\times$ 84,400 $=$ 137,621,289.

291. Le même poids *mm* produit sur le point D une charge qu'il faut évaluer. Supposant une puissance *ee* qui tire de E en Q, l'on aura *ee* : *mm* :: DP : DQ, ou *ee* $= \frac{3552670}{46} \times$ 10,200 $=$ 787,770. La charge sur le point D est *mm* $-$ *ee* $=$ 3,552,670 $-$ 787,770 $=$ 2,764,900, qui est une autre puissance résistante. Son bras de levier BE $=$ 28,500; son énergie $=$ 78,799,650. L'autre puissance résistante *nn* est le seizième du poids du mur des contreforts et des socles $=$ 4,591,129, son bras de levier

FG = 18,660; son énergie sera 85,701,074; on aura donc les puissances agissantes = 8,320,574 + 137,621,289 = 145,941,863, et les puissances résistantes = 4,764,231 + 78,799,650 + 85,701,074 = 169,264,955; ainsi le rapport des unes aux autres est :: 146 : 169 :: 100 : 116, ou environ comme 6 : 7.

Les dimensions étoient assez bien réglées s'il n'étoit point arrivé d'événemens extraordinaires.

292. On peut donc conclure que les dimensions de ce dôme étoient assez bien réglées puisque l'action de la puissance résistante étoit d'un septième plus forte que celle de la puissance agissante; mais cet excédent d'action n'étant pas considérable, une cause étrangère, telle qu'un tremblement de terre ou des coups de tonnerre, ayant pu désunir les mortiers, et séparer du corps du mur les contreforts et les socles qui faisoient toute la force de cet édifice, parce qu'ils éloignoient le point d'appui, alors la poussée des voûtes a agi d'autant plus puissamment que le point d'appui se trouvoit rapproché de près de moitié.

Calcul de la poussée après la séparation des contreforts.

293. Je ferai encore le calcul de la poussée de ces voûtes en supposant que la tour du dôme soit entièrement séparée des contreforts et du socle sur lequel ils s'appuient; alors le centre de gravité du mur est en N, et la distance g f au point d'appui f = 7 $\frac{2}{3}$; le poids du mur séparé des contrefort est 3,364,118 (287), son bras de levier est 7 $\frac{2}{3}$; son énergie sera donc 25,791,571.

La puissance agissante est presque le double de la puissance résistante.

294. Les autres puissances résistantes sont comme ci-dessus (289) 167,166 + (291) 2,764,900 = 2,932,066; mais le bras de levier Bf ne sera plus que 14 $\frac{1}{2}$, ainsi l'énergie sera 42,514,957.

Quoique les contreforts et leur socle soient séparés du mur, ils opposent cependant quelque résistance à la poussée. Le centre de gravité de cette partie détachée se trouve en d, et le bras de levier dF = 6 $\frac{3}{4}$. Le seizième du cube est 1,227,011 (287); ainsi l'énergie sera 8,282,324, et l'énergie totale des puissances résistantes sera 76,588,852. La puissance agissante est toujours comme ci-devant (291) 145,941,863, qui est presque le double de la puissance résistante, le rapport étant comme 100 : 52.

Autre calcul en suppo

295. On peut encore faire ce calcul en supposant la rupture

sant la rupture à la moitié de la hauteur des fenêtres.

en JI, à la moitié de la hauteur des fenêtres; alors le seizième du poids du tambour et de la moitié des contreforts est 3,364,118, et comme DJ : DB :: 7 : 16. On aura le cube DJnV $= \frac{3364118}{16} \times 7 = 1,471,801$. Le point d'appui étant sur le pourtour extérieur en I, le bras de levier sera de 4 pieds $\frac{1}{2}$; son énergie sera 6,623,104. Les autres puissances résistantes sont comme ci-dessus (294) 2,932,066, le bras de levier JI = 9 pieds, leur énergie sera 26,388,594; ainsi l'énergie totale de ces puissances sera 33,011,698; celle des puissances agissantes étant toujours 145,941,863, il résulte que le rapport de ces deux puissances est comme 100 : 23.

Le dôme seroit tombé sans les réparations qu'on y a faites.

296. Il n'est donc pas étonnant que cette séparation des contreforts ayant été une fois opérée par une cause quelconque, les murs n'aient point été assez forts pour résister à la poussée, et le dôme seroit infailliblement tombé si cette désunion eût été parfaite et si, outre les cercles de fer qui relioient la voûte depuis sa base jusqu'à son sommet, on n'en eût pas encore ajouté plusieurs autres.

297. Malgré la diversité des opinions qui existoient sur les causes des dégradations du dôme, lorsqu'en 1743 il fut question enfin d'y porter remède, tous les savans et artistes qui furent consultés adoptèrent unanimement le moyen d'ajouter de nouveaux cercles de fer aux anciens; mais ce moyen est-il réellement bien assuré? étoit-ce le meilleur que l'on put employer?

On n'a cependant pas détruit la cause.

298. L'on a bien cherché effectivement à s'opposer à l'effet de la poussée; mais on n'en n'a nullement détruit la cause. Les contreforts n'étant pas plus liés ni pas plus forts qu'ils l'étoient, toute la force de la poussée a dû chercher à agir contre les cercles de fer, mais ces cercles n'ont qu'une résistance bornée qui pouvoit être bien proche de son maximum pour les cercles anciens, puisqu'ils avoient dû s'allonger de 18 à 19 pouces, ou d'environ $\frac{1}{300}$ de leur longueur, ce qui excède le quadruple de la quantité dont les fers s'allongent par la chaleur du soleil.

Si les cercles nouveaux se sont allongés comme les anciens, il peut se faire que les anciens soient cassés et ne servent plus à

rien, et que les choses soient à présent au même état que lorsqu'on y a fait les réparations au milieu de ce siècle. Les nouveaux cercles peuvent encore durer quelque tems comme avoient fait les autres; mais ils finiront infailliblement par se rompre, ce qui entraîneroit la ruine d'un édifice qu'il est cependant de la plus grande importance de conserver. Quelques voyageurs ont même rapporté que les contreforts continuoient à se déverser et à se fendre.

La principale cause de tous les désastres provient de la foiblesse des contreforts.

299. L'on ne peut douter que la principale cause de tous ces désastres ne provienne de la foiblesse des contreforts puisqu'ils n'occupent pas la huitième partie du socle. Si pour soutenir un mur de terrasse qui cède à la poussée on mettoit des contreforts de 4 pieds de largeur, à 30 pieds de distance les uns des autres, il seroit aisé de juger qu'ils ne seroient pas, à beaucoup près, suffisans pour empêcher le mur d'être renversé entre ces contreforts. L'intervalle qui est entre ceux du dôme de Saint-Pierre est donc trop grand pour que les parties intermédiaires puissent être soutenues par les points d'appui de ces contreforts; puisqu'elles n'ont d'autre bras de levier que l'épaisseur des murs, qui n'est guère que le tiers de celui qui résulte de ces contreforts.

Le seul moyen de prévenir la chûte de ce dôme est d'augmenter l'épaisseur des contreforts.

300. Le parti qui paroît le meilleur seroit donc de donner plus de force et de masse à ces contreforts, et l'on peut aisément leur donner 10 à 12 pieds de largeur au lieu de 3 (fig. 24), en replaçant les mêmes colonnes, les éloignant davantage, et formant entre ces colonnes un groupe de figures adhérent à ces contreforts, on augmenteroit encore leur solidité; on pourroit aussi relier la base du dôme avec ces contreforts par des amortissemens; et en construisant ces piliers les lier avec des fers aux murs du dôme, ce qui leur donneroit la même solidité que s'ils eussent été faits en même tems que lui. L'on reporteroit alors le point d'appui au point F au lieu du point f, ce qui donneroit à la force résistante une énergie double de celle qu'elle a actuellement; il paroît douteux que si l'on ne prend pas ce parti, qui ne gâteroit rien à la décoration, ce dôme puisse subsister encore long-tems.

301. Mon objet n'a pas été ici de répondre à tous les articles du mémoire du citoyen Rondelet ; je ne dirai rien par exemple de l'efficacité des ceintres qu'il propose, parce que je crois avoir démontré que plus ils seroient efficaces pour porter, et plus ils seroit dangereux qu'ils ne fissent fendre la tour du dôme ; je dirai seulement que les voûtes, dont la courbure est une chaînette, ne portent pas un poids plus considérable que les voûtes en arc de cercle ; elles n'ont même d'avantage sur celles-ci que quand elles sont extradossées et qu'elles ne portent rien.

Je dirai encore que s'il se trouve de la différence dans les résultats des différentes expériences qui ont été faites avec les différentes machines employées pour connoître le poids que peuvent porter les pierres, c'est parce qu'on n'a pas eu égard au frottement du tourillon, qui produit une résistance assez considérable, mais que l'on peut calculer.

J'observerai enfin, que si dans le commencement de ces discussions on a pu avoir quelques craintes que cet édifice ne fut dans un danger imminent, si l'on a dit qu'il n'y avoit que le tems nécessaire d'en prévenir la ruine, on doit bien être à présent revenu de cette crainte chimérique, puisqu'il a été bien reconnu que depuis plus d'un an il n'y a eu ni tassement, ni nouvelle fente, ni éclats aux piliers.

TABLE de l'épaisseur que doivent avoir les pieds-droits des voûtes sphériques extradossées lorsqu'ils sont percés de fenêtres formant un quart de vuide.

		12 p.	24 p.	48 p.	96 p.
Diamètres des voûtes...........		12 p.	24 p.	48 p.	96 p.
Epaisseur à la clef..............		1.250	1.500	2.000	2.000
Hauteur des pieds-droits..........	pour 6 p.	3.405	5.454	9.141	15.920
	pour 12	4.245	6.074	10.417	16.755
	pour 18	4.624	6.342	11.072	17.989
	pour 24		6.491	11.534	19.163
	pour 30		6.584	11.714	20.361
	pour 60			12.519	21.488

TABLE

De l'épaisseur des pieds-droits des voûtes en plein ceintre, ou surbaissées au tiers et au quart.

Diamètre des voûtes.	Hauteur des pieds-droits.	Epaisseur des voûtes à la clef.	Epaisseur des culées des voûtes en plein ceintre.	Grand et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au tiers.	Grand, moyen et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au quart.
	pieds.		pieds.		pieds.		pieds.
	0		1 13		1.12	pieds.	1.15
1 toise	3		2.10	pieds.	2.11		2.25
	6	pieds.	2.54	grand, 4.[illegible]0	2.45	grand, 7.50	3.40
ou	9	1.125	2.78		2.78	moyen, 1 50	3 58
	12		2.94	petit, 1.63	3.11		3.73
6 pieds.	15		3.06		3.44	petit, 1.19	3.85
	18		3.14		3.76		3.93
	0		2.15		2.25		2.29
	3		3.15		3.81		3.90
2 toises	6		3.73		4.58	grand, 15.00	4 84
ou	9	1.250	4.11	grand, 8.73	5.04	moyen, 3.00	5.42
	12		4.58	petit, 3.26	5.34		5.71
12 pieds.	15		4.58		5.56	petit, 2.39	5.95
	18		4.83		5.72		6.14
	0		3.13		3.40		3.49
3 toises	3		4.13		5.01		5.40
	6		4.78	grand, 13.09	5.93	grand, 22.50	6.47
ou	9	1.375	5.24		6.52	moyen, 4.50	7.15
	12		5.65	petit, 4.90	6.95		7.54
18 pieds.	15		5 85		7.26	petit, 3.60	7.98
	18		6.13		7.52		8.15
	0		4.07		4.47		4.74
4 toises	3		5.05		6.12		6.85
	6		5.76	grand, 17.45	7.15	grand, 30.00	8.04
ou	9	1.500	6.29		7.85	moyen, 6.00	8 82
	12		6.86	petit, 6.53	8.39		9.36
24 pieds.	15		7.04		8.76	petit, 4.80	9.76
	18		7.34		9.07		10.07

Diamètre des voûtes.	Hauteur des pieds-droits.	Epaisseur des voûtes à la clef.	Epaisseur des culées des voûtes en plein ceintre.	Grand et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au tiers.	Grand moyen et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au quart.
	pieds.		pieds.		pieds.		pieds.
	0		4.94		5.59	pieds.	5.92
5 toises	3		5.93	pieds.	7.23	grand, 57.50	8. 6
	6	pieds.	6.68	grand, 21.82	8.46		9.36
ou	9	1.625	7.26		9.14	moyen, 7.50	10.19
30 pieds.	12		7.80	petit, 8.16	9 72	petit, 6.00	10.88
	15		8.11		10.23		11.22
	18		8.45		10.63		11.73
	0		5.76		6.57		7.07
6 toises	3		6.78		8.25		9 22
	6		7.33	grand, 26.19	9.41	grand, 45.00	10.62
ou	9	1.750	8.17		10.30	moyen, 9.00	11.51
36 pieds.	12		8.68	petit, 9.80	10.97	petit, 7.20	12.34
	15		9.11		11.51		12.60
	18		9.48		11.95		13.31
	0		6.62		7.63		8.21
7 toises	3		7.63		9.30	grand, 52.50	10.38
	6		8.43	grand, 30.55	10.53		11.84
ou	9	1.875	9.08		11.49	moyen, 10.50	12.86
42 pieds.	12		9.63	petit, 11.44	12.24	petit, 8.40	13.71
	15		10.09		12.85		14.19
	18		10.70		13.56		14.81
	0		7.44		8.61		9.34
8 toises	3		8.46		10.28		11.52
	6		9.27	grand, 34.93	11.56	grand, 60.00	13.05
ou	9	2.000	9.95		12.55	moyen, 12.00	14.19
48 pieds.	12		10.53	petit, 13.07	13.35	petit, 9.60	15.07
	15		11.03		14.00		15.76
	18		11.86		14.54		16.63
	0		8.40		9.39		10.46
9 toises	3		9.32		11.36	grand, 67.50	12.64
	6		10.17	grand, 39.37	12.66		14.22
ou	9	2.250	10.86		13.71	moyen, 13.50	15.42
54 pieds.	12		11.46	petit, 14.71	14.55	petit, 10.80	16.35
	15		11.98		15.25		17.11
	18		12.79		15.85		17.68

Diamètre

Diamètre des voûtes.	Hauteur des pieds-droits.	Epaisseur des voûtes à la clef.	Epaisseur des culées des voûtes en plein ceintre.	Grand et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au tiers.	Grand moyen et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au quart.
	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.
10 toises ou 60 pieds.	0	2.500	9.35	grand, 43.66	10.72	grand, 75.00	11.57
	3		10.25	petit, 16.34	12.43	moyen, 15.00	13.76
	6		11.07		13.77	petit, 12.00	15.39
	9		11.77		14.85		16.64
	12		12.39		15.75		17.63
	15		12.93		16.50		18.45
	18		13.72		17.14		19.08
11 toises ou 66 pieds.	0	2.750	10.29	grand, 48.03	11.76	grand, 82.50	12.68
	3		11.13	petit, 17.97	13.48	moyen, 16.50	14.88
	6		11.96		14.84	petit, 13.20	16.56
	9		12.68		15.97		17.86
	12		13.32		16.90		18.92
	15		13.89		17.70		19.79
	18		14.64		18.59		20.47
12 toises ou 72 pieds.	0	3.000	11.21	grand, 52.39	12.80	grand, 90.00	13.78
	3		12.01	petit, 19.61	14.52	moyen, 18.00	16.00
	6		12.85		15.92	petit, 14.40	17.78
	9		13.59		17.08		19.08
	12		14.25		18.06		20.20
	15		14.84		18.90		21.13
	18		15.57		19.63		21.86
13 toises ou 78 pieds.	0	3.250	12.14	grand, 56.75	13.82	grand, 97.50	14.88
	3		13.09	petit, 21.24	15.54	moyen, 19.50	17.11
	6		13.74		16.97	petit, 15.60	18.89
	9		14.50		18.17		20.30
	12		15.18		19.19		21.47
	15		15.80		20.08		22.46
	18		16.50		20.80		23.24
14 toises ou 84 pieds.	0	3.500	13.05	grand, 61.12	14.85	grand, 105.00	15.99
	3		13.86	petit, 22.87	16.56	moyen, 21.00	18.23
	6		14.63		18.03	petit, 16.80	20.05
	9		15.30		19.27		21.51
	12		16.11		20.34		22.74
	15		16.74		21.27		23.78
	18		17.42		22.99		24.62

Diamètre des voûtes.	Hauteur des pieds droits.	Epaisseur des voûtes à la clef.	Epaisseur des culées des voûtes en plein ceintre.	Grand et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au tiers.	Grand, moyen et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au quart.
	pieds.		pieds.		pieds.		pieds.
15 toises ou 90 pieds.	0	pieds. 3.750	13.95	pieds. grand, 65.48	15.86	pieds. grand, 112.50	17.09
	3		14.74	petit, 24 50	17.56	moyen, 22.50	19.33
	6		15.51		19.04	petit, 18.00	21.21
	9		16.30		20.32		22.73
	12		17.03		21.43		24.00
	15		17.69		22.41		25.11
	18		18.35		23.28		26.01
16 toises ou 96 pieds.	0	4.000	14.84	grand, 69.86	16.86	grand, 120.00	18.19
	3		15 71	petit, 26.14	18.55	moyen, 24 00	20.44
	6		16 40		[illegible]	petit, 19.20	22.36
	9		17.21		21.37		23.94
	12		17 96		22.53		25.27
	15		18.64		23.55		26.43
	18		19.27		24.46		27.38
17 toises ou 102 pieds.	0	4.125	15.72	grand, 74.22	17.85	grand, 127.50	19.29
	3		16.52	petit, 27.78	19.55	moyen, 25.50	21.71
	6		17.31		21.07	petit, 20.40	23.48
	9		18.13		22.40		25.07
	12		18.88		23.57		26.44
	15		19.58		24.61		27.62
	18		20.22		25.54		28.61
18 toises ou 108 pieds.	0	4.250	16.60	grand, 78.58	18.84	grand, 135.00	20.41
	3		17.43	petit, 29.41	20.56	moyen, 27.00	22.79
	6		18.23		22.07	petit, 21.60	24.60
	9		19.05		23.43		26.21
	12		19.81		24.61		27.61
	15		20.51		25.68		28.82
	18		21.16		26.63		29.84
16 toises ou 114 toises.	0	4.375	17.47	grand, 62.95	19.82	grand, 135.50	21.51
	3		18.34	petit, 31.05	21.54	moyen, 28.50	23.96
	6		19.14		23.05	petit, 21.80	25.72
	9		19 96		24.42		27.34
	12		20.73		25.62		28.77
	15		21.45		26.71		30.00
	18		22.10		27.68		31.06

Diamètre des voûtes.	Hauteur des pieds-droits.	Epaisseur des voûtes à la clef.	Epaisseur des culées des voûtes en plein ceintre.	Grand et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au tiers.	Grand, moyen et petit rayon.	Epaisseur des culées des voûtes surbaissées au quart.
	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.	pieds.
20 toises ou 120 pieds.	0	4.500	18.33	grand, 87.32	20.78	grand, 150.00	22.62
	3		19.25	petit, 32.68	22.52	moyen, 30.00	25.13
	6		20.05		24.03	petit, 24.00	26.83
	9		20.88		25.42		28.46
	12		21.66		26.63		29.93
	15		22.39		27.73		31.18
	18		23.05		28.73		32.29
21 toises ou 126 pieds.	0	4.625	19.18	grand, 91.68	21.75	grand, 157.50	23.72
	3		20.15	petit, 34.31	23.48	moyen, 25.20	26.30
	6		20.96		25.00	petit, 25.20	27.94
	9		21.17		26.40		29.59
	12		22.58		27.63		31.09
	15		23.32		28.75		32.36
	18		23.99		30.06		33.51
22 toises ou 132 pieds.	0	4.750	20.02	grand, 96.05	22.72	grand, 165.00	24.82
	3		20.15	petit, 35.95	24.45	moyen, 33.00	27.46
	6		21.86		25.97	petit, 26.42	29.05
	9		22.71		27.38		30.71
	12		23.51		28.63		32.24
	15		24.25		29.76		33.54
	18		24.93		30 79		34.72
23 toises ou 138 pieds.	0	4.875	20.85	grand, 100.42	23.66	grand, 172.50	25.91
	3		20.95	petit, 37.58	25.39	moyen, 34.50	28.63
	6		22.76		26.90	petit, 27.60	30.16
	9		23.62		28.33		31.82
	12		24.43		29.59		33.39
	15		25.19		30.74		34.72
	18		25.87		31.78		35.94
24 toises ou 144 pieds.	0	5.000	21.67	grand, 104 78	24.62	grand, 180.00	27.00
	3		22.75	petit, 39.22	26.34	moyen, 36.00	29.78
	6		23.67		27.84	petit, 28.80	31.26
	9		24.53		29.28		32.95
	12		25.35		30.56		34.54
	15		26.12		31.72		35.89
	18		26.81		32.78		37.15

ERRATA.

PAGE 21 ligne 7 *j g h g lisez* j g h G.

22 ligne 4 *j h lisez* J h. Ligne 19 *f lisez* f.

26 ligne 7 chargées, *lisez* chargés.

27 ligne 28 parce que ne portant, *lisez* parce que ces piliers ne portant.

29 ligne 26 sur les forces, *lisez* sur les socles.

30 ligne 28 épanflures, *lisez* épaufrures.

32 ligne 19 *effacez* que les architectes en ont faites.

54 ligne 30 pouces, *lisez* pieds.

60 ligne 25 seront, *lisez* se sont.

64 ligne 8 sur les piliers, *ajoutez* (fig. 19.)

65 ligne pénultième, en trois, *lisez* en deux.

66 ligne 16 958.963 + *lisez* 9.569 363 +

75 ligne 3 inclination, *lisez* inclinaison.

78 ligne 25 à quoi, *lisez* auxquels.

92 ligne 3 ne soit pas plus efficace que toute autre, *lisez* ne puisse pas être très-bien remplacée par des forces obliques.

92 ligne 12 1 pied 6 pouces, *lisez* 1 pied 4 pouces.

92 ligne 13 (140), *lisez* (138)

93 ligne 21 sailie, *lisez* saillie.

94 ligne dernière, leurs ets, *lisez* leurs projets.

99 ligne 20 afin que fer, *lisez* afin que le fer.

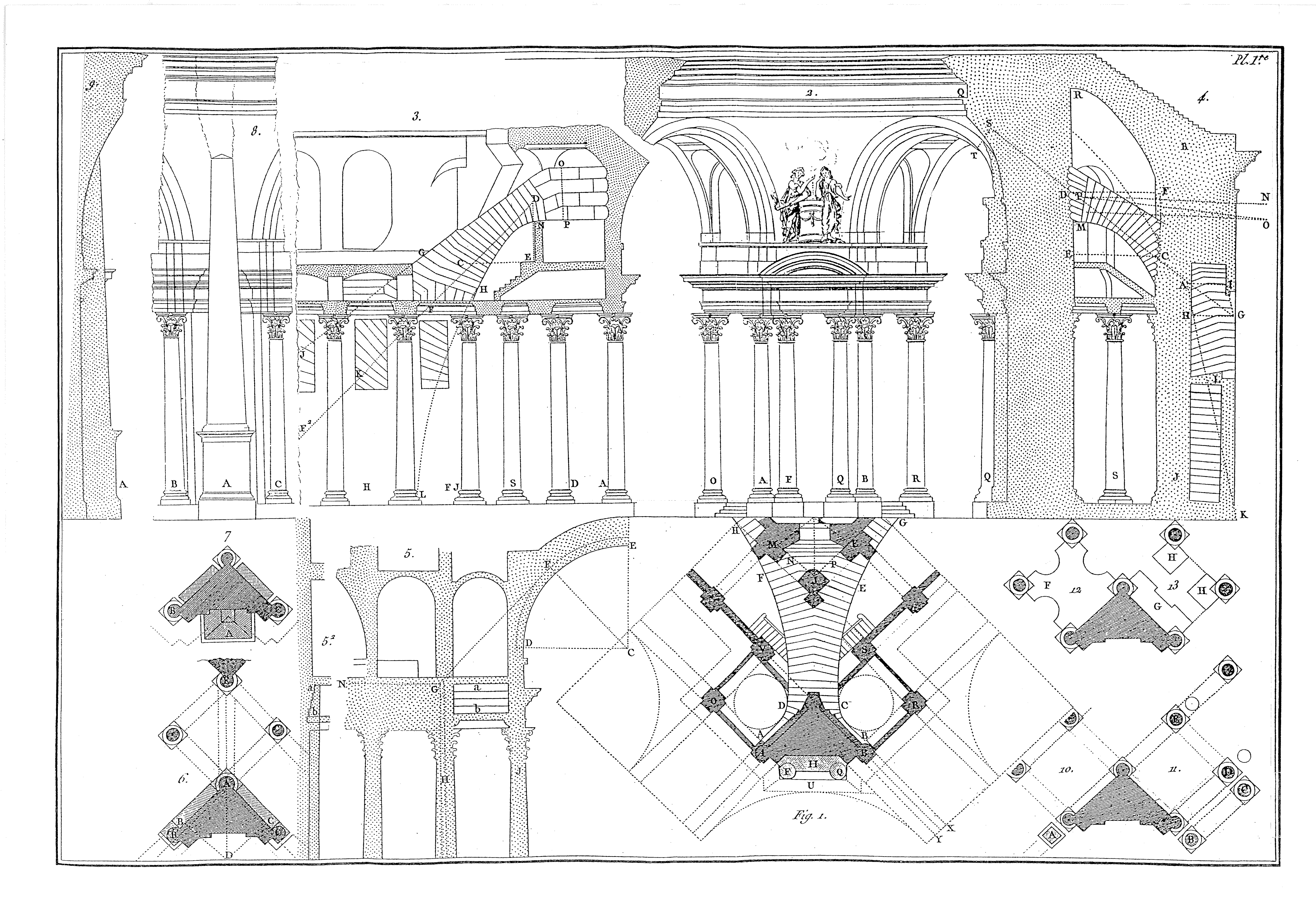
99 ligne 21 remplit, *lisez* remplisse.

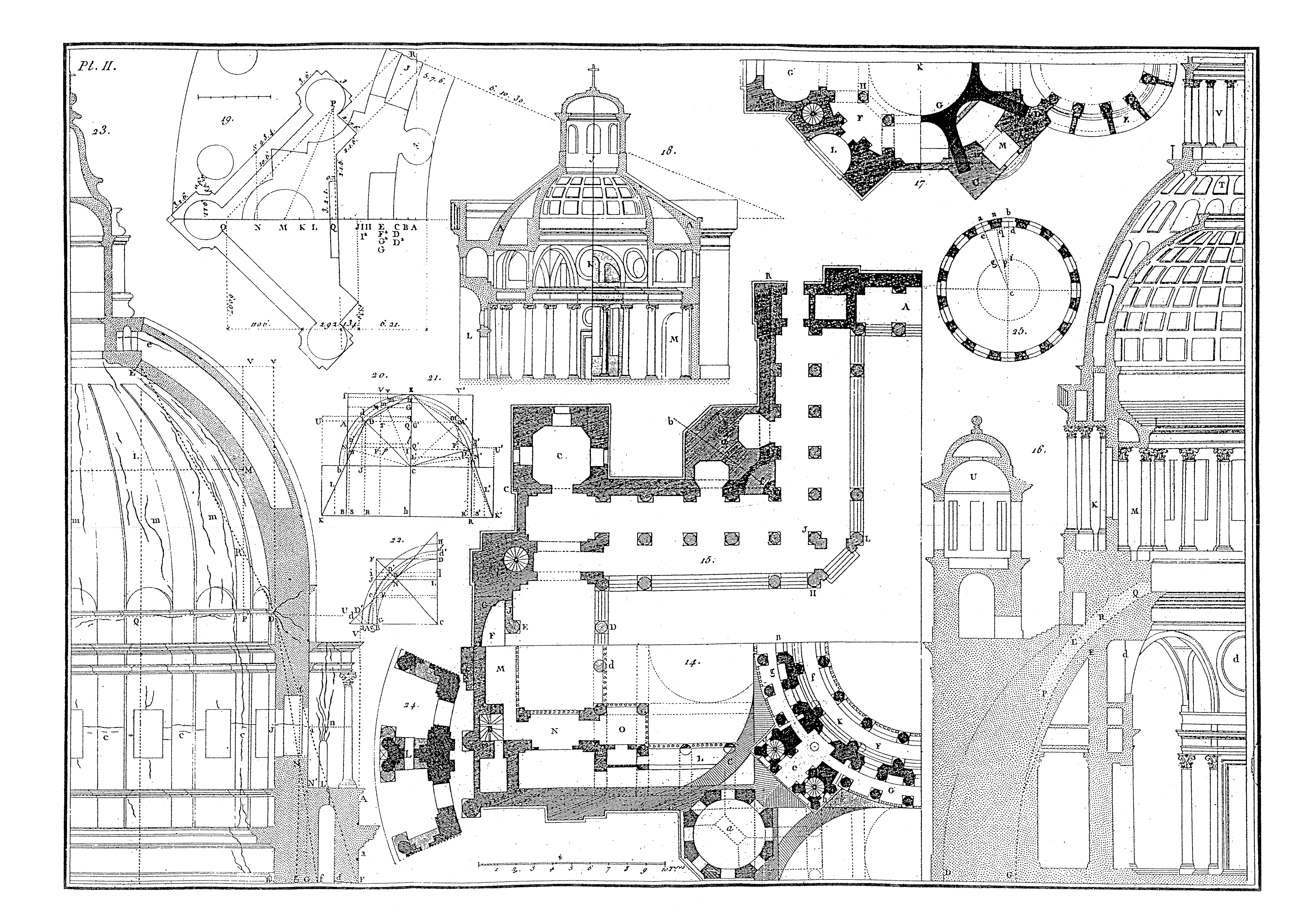
115 ligne 31 10 pieds .368, *lisez* 10. 368

116 ligne 31 survenir, *lisez* provenir.

125 ligne 24 et, *lisez* en.

126 ligne 2 de la table, 2000 2000, *lisez* 2000 4000


Pl. I.re
2.
3.
4.
5.
5.2
6.
7
8.
9.
10.
11.
12
13
Fig. 1.


Pl. II.
23.
19.
18.
17.
16.
15.
14.
20.
21.
22.
24.
25.